

真空耦合碳氧反应钢液深度 脱氮的试验研究

吴华杰, 刘座宇, 孙 悦, 张 可, 霍佳兴, 徐佳龙

(北京科技大学钢铁协同共性创新中心, 北京 100083)

摘 要: 钢中氮含量过高会显著劣化钢材力学性能及后续加工性能, 实现稳定、高效的深度脱氮是转炉与电弧炉炼钢流程中生产高品质钢的关键技术难题。利用 10 kg 真空感应炉试验, 提出并验证了一种真空条件下耦合碳氧反应内生 CO 气泡强化钢液深度脱氮的方法, 系统研究了碳氧反应强度及初始氮含量对脱氮行为的影响, 并从热力学与动力学角度进行了分析。结果表明, 在真空条件下, 碳氧反应生成的内生 CO 气泡可显著增加气-液反应界面, 从而大幅提升脱氮效率; 随着碳氧反应强度的提高, 钢液脱氮速率显著增加, 在初始碳含量为 $1\ 500\times 10^{-6}$ 时, 钢液氮含量可在 10 min 内降至 10×10^{-6} 以下。相同碳氧反应强度条件下, 初始氮含量对脱氮速率影响不显著, 但对终点氮含量具有决定作用。热力学计算表明, 试验获得的最低氮含量已接近 30 Pa 真空条件下的平衡溶解度。动力学分析结果表明, 脱氮过程受液相传质与界面化学反应的混合控制, 并在试验尺度下建立了脱氮速率与脱碳速率之间的 2/3 次方定量关系。研究还发现, 在超低氮区间内, 随着碳氧反应减弱, 钢液脱氮易向吸氮行为转变, 需在脱氮后期严格控制真空条件。试验结果可为真空精炼过程的深度脱氮工艺优化提供理论依据和试验参考。

关键词: 脱氮; 碳氧反应; 动力学; 内生气泡; 真空

中图分类号: TF76, TF704.6

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)04-0085-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.04.010

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Experimental study on deep denitrogenation of molten steel via vacuum coupled with carbon-oxygen reaction

WU Huajie, LIU Zuoyu, SUN Yue, ZHANG Ke, HUO Jiaying, XU Jialong

(Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Excessively high nitrogen content in steel significantly deteriorates its mechanical properties and subsequent processing performance. Achieving stable and efficient deep denitrogenation is a key technical challenge in producing high-quality steel during the converter and electric arc furnace steel-making processes. This study, utilizing experiments in a 10 kg vacuum induction furnace, proposes and validates a method to enhance deep denitrification in molten steel by coupling carbon-oxygen reactions to generate endogenous CO bubbles under vacuum conditions. The effects of carbon-oxygen reaction intensity and initial nitrogen content on the denitrification behavior were systematically investigated and analyzed from both thermodynamic and kinetic perspectives. The results indicate that under vacuum conditions, the endogenous CO bubbles generated by the carbon-oxygen reaction significantly increase the gas-liquid reaction interface, thereby greatly enhancing the denitrification efficiency. As the intensity of the carbon-oxygen reaction increases, the denitrification rate of the molten steel accelerates

收稿日期: 2026-03-03; 修回日期: 2026-03-10; 接受日期: 2026-03-12

作者简介: 吴华杰, 1978 年出生, 男, 安徽黄山人, 博士, 副研究员, 通信作者, 长期从事高品质特殊钢冶金质量控制理论和技术研究, E-mail: wuhuajie@ustb.edu.cn。

markedly. With an initial carbon content of 1500×10^{-6} , the nitrogen content in the steel can be reduced to below 10×10^{-6} within 10 minutes. Under the same carbon-oxygen reaction intensity, the initial nitrogen content does not significantly affect the denitrification rate but plays a decisive role in determining the final nitrogen content. Thermodynamic calculations show that the minimum nitrogen content achieved in the experiments is close to the equilibrium solubility under a vacuum of 30 Pa. Kinetic analysis reveals that the denitrification process is controlled by a mixed mechanism involving liquid-phase mass transfer and interfacial chemical reactions. A quantitative relationship was established at the experimental scale, showing that the denitrification rate is proportional to the $2/3$ power of the decarburization rate. The study also found that in the ultra-low nitrogen range, as the carbon-oxygen reaction weakens, the molten steel's behavior can easily shift from denitrification to nitrogen absorption, necessitating strict control of vacuum conditions during the later stages of denitrification. The findings of this paper provide a theoretical basis and experimental reference for optimizing deep denitrification processes in vacuum refining processes.

Key words: denitrogenation; carbon-oxygen reaction; kinetics; internal bubbles; vacuum

0 引言

氮在钢中通常被视为有害元素,其含量(全文含量均指质量百分数)过高会降低钢材的力学性能和冷轧材的成型性能^[1]。无论是传统转炉流程还是快速发展的电弧炉流程,钢液氮含量的控制始终是生产高品质钢的核心挑战^[2]。一方面,众多高端装备制造领域对钢材性能提出了极致要求,推动着超低氮钢(氮含量常需低于 30×10^{-6} ,甚至 10×10^{-6})的需求不断增长,转炉流程生产的钢液氮含量较低,但进一步将氮稳定控制在极低水平(如 $<20 \times 10^{-6}$)难度较大^[3];另一方面,在绿色低碳转型趋势下地位日益凸显的电弧炉(EAF)流程^[4-6],因其电弧炉工艺中原料带入、空气渗入及电弧区电离等因素^[7],电弧炉流程生产的钢液氮含量普遍较高,通常处于 $60 \times 10^{-6} \sim 120 \times 10^{-6}$,远高于高品质钢对低氮含量的要求(如汽车板 IF 钢要求氮含量低于 30×10^{-6}),因而难以满足高端产品的生产需求。因此,开发高效、稳定的深度脱氮技术是当前钢铁冶金领域亟待攻克的重要课题。

目前,钢液脱氮的主要手段包括真空脱氮、熔渣脱氮和气泡携带法脱氮等。其中,真空脱氮通过降低气相氮分压以减小氮的热力学溶解度,是实现深度脱氮的有效方法^[8-9]。近年来,朱荣等人^[10-11]进行了 CO_2 等气体绿色炼钢的技术探索,发现借助气-液反应界面效应可实现钢液脱氮与净化。总体而言,单一方法,如真空或气泡法可在特定条件下实现深度脱氮,将氮含量降至约 10×10^{-6} 以下^[12-14],但需要的时间较长,一般 $40 \sim 60$ min。根据热力学原理,降低系统压力可使碳氧反应的平衡向生成 CO 的方向移动,从而大幅增强碳的脱氧能力,其反应产物 CO 气泡在钢液内部形核长大,构成无数个氮分压接近于零的“微型真空室”,为氮的脱除提供巨大反

应界面的同时产生强烈的熔池搅拌,形成高效的气泡携带法脱氮。因此,将真空的低氮分压优势与内生 CO 气泡的高效动力学条件有机结合,有望突破单一方法的效率瓶颈,实现深度与速度的协同提升。基于此,研究通过利用碳氧反应并耦合真空处理来摸索钢液的高效脱氮的路径,探索真空条件下碳氧反应对钢液脱氮行为的影响机制,以期能为工业生产超低氮钢提供数据支撑。

1 试验方法

研究设计了两组试验,分别探讨了碳氧反应强度对钢液脱氮过程的影响,以及在相同碳氧反应强度下初始氮含量对脱氮效果的影响。试验通过加入不同质量的碳调整钢液的初始碳含量,并根据碳与氧 1:1 的物质的量比,配比加入对应质量的氧化铁(Fe_2O_3),从而控制碳氧反应强度。

所有试验均在 10 kg 真空感应炉内进行,试验设备示意图如图 1 所示,炉内的真空度维持在 30 Pa,钢液表面温度 1600°C ,使用的坩埚内径为 106 mm,内高 180 mm。试验所用钢液为初始氮含量分别为 21×10^{-6} 和 55×10^{-6} 的低氮 IF 钢,其化学成分见表 1。

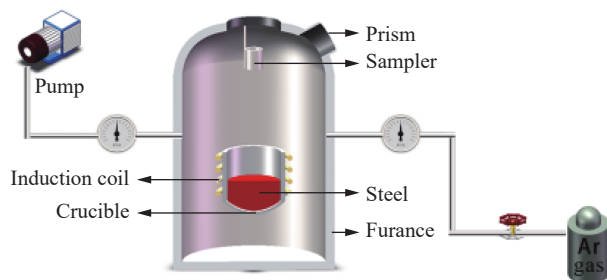


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experiment apparatus

表1 试验钢母料成分

Table 1 Chemical composition of experimental steel

C	Si	Mn	P	S	Alt	Ti	O
0.002	0.01	0.12	0.007	0.005	0.032	0.07	0.001 2

为探讨碳氧反应强度对脱氮的影响,试验通过加入不同质量的碳,控制碳含量分别为 400×10^{-6} 、 $1\,000 \times 10^{-6}$ 、 $1\,500 \times 10^{-6}$ 。根据碳与氧的比例,氧化铁粉(Fe_2O_3)按照物质的量比添加至坩埚底部。试验开始时,真空感应炉抽真空至 30 Pa 并稳定,之后加热直至金属料完全熔化,熔化时间为试验计时的起点。在钢液熔化后的不同时间点(0、10、25、40、50 min)分别取样,并使用 TCH 600 氧氮氢分析仪及 EMIA-820 碳硫分析仪测定各样品的碳和氮含量。

为探讨初始氮含量对脱氮过程的影响,试验中使用了初始氮含量分别为 22.1×10^{-6} 和 31.5×10^{-6} 的两组钢液,且两组钢液的碳含量均保持在 $1\,000 \times 10^{-6}$ 。其他试验条件与碳氧反应强度对脱氮试验的影响相同。

2 结果与分析

2.1 碳氧反应强度对脱氮的影响

三组不同碳氧反应强度下的钢液氮含量随时间的变化如图2所示。

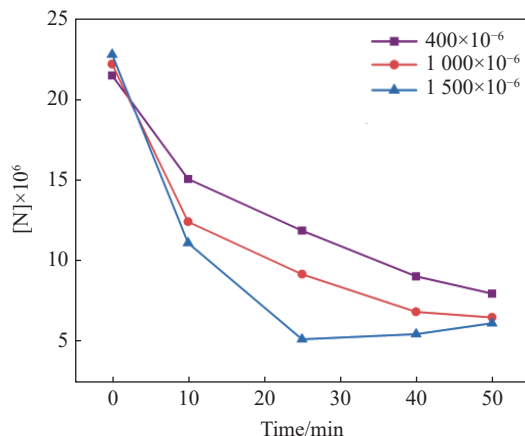


图2 不同配碳量下氮含量随时间的变化

Fig. 2 Variation of nitrogen content over time with different carbon additions

由图2可见,当[N]含量脱至 10×10^{-6} 时,配碳量为 400×10^{-6} 、 $1\,000 \times 10^{-6}$ 、 $1\,500 \times 10^{-6}$ 分别用时约 40、23、13 min。低、中、高配碳量试验组的终点氮含量分别为 7.9×10^{-6} 、 6.4×10^{-6} 、 6.1×10^{-6} 。配碳量 $1\,000 \times 10^{-6}$ 和 $1\,500 \times 10^{-6}$ 的终点氮含量差异不显著。当加碳量为 $1\,500 \times 10^{-6}$ 时,钢液中氮含量在 25 min 时降低至 5×10^{-6} 左右,之后出现吸氮现象。总体来

看,初始碳含量越高,脱氮速率越大,终点氮含量更低。钢液脱氮速率增加,这是因为碳氧反应的液气界面面积增加,碳氧反应加剧,生成的 CO 气泡增加^[15]。通过碳氧反应内生气泡强化脱氮的方法,可以在短时间达到低氮钢的水平。

图3对比了三组不同碳氧反应强度试验中钢液碳含量随碳氧反应进行的变化。

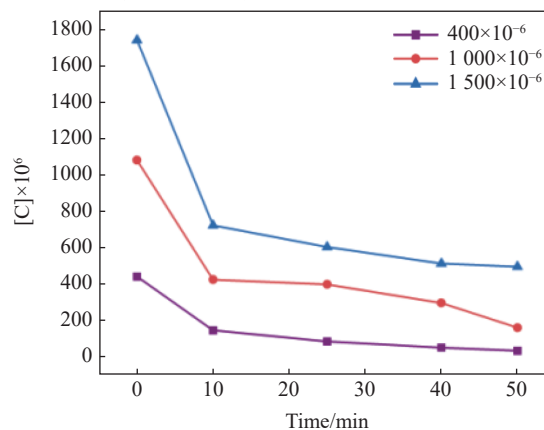


图3 不同配碳量下碳含量随时间的变化

Fig. 3 Variation of carbon content over time with different carbon additions

在反应前期(0~10 min)时,加碳量为 $1\,500 \times 10^{-6}$ 的钢液的碳含量从 $1\,734.18 \times 10^{-6}$ 大幅降低到 720.25×10^{-6} ;加碳量为 $1\,000 \times 10^{-6}$ 的钢液碳含量从 $1\,076 \times 10^{-6}$ 降低到 422×10^{-6} ;加碳量为 400×10^{-6} 的钢液碳含量从 438×10^{-6} 降到 144×10^{-6} 。由图3可明显看出,初始碳含量越高,碳氧反应越剧烈,脱碳速率也相应增大。原因是在碳氧反应前期,[C]与 Fe_2O_3 中的 [O] 迅速激烈反应,碳含量急剧下降生成 CO。反应 10 min 后,钢液中 [C] 与 Fe_2O_3 中的 [O] 反应变缓,钢液中的碳含量降幅逐渐变小。反应 50 min 后碳氧反应达到平衡,脱氮反应亦趋近平衡。由于生成的碳氧化物为气态,钢液中产生的 CO 气泡对于钢液中的 [N] 来说相当于真空,使其产生脱氮效果,将钢液中的 [N] 带走,导致钢液中氮含量降低^[16-17]。钢液中溶解的碳提高了钢中氮元素的活度,CO 气泡表面积大,氮分压非常低,钢液的平衡氮也低,因此大量的 CO 气泡有利于钢液脱氮。

2.2 初始氮含量对脱氮的影响

在配碳量都为 $1\,000 \times 10^{-6}$,初始氮含量分别为 22.07×10^{-6} 和 31.50×10^{-6} 时,对比了两组钢液氮含量随着时间的变化情况,如图4所示。

由图4可见,钢液中初始氮含量为 31.50×10^{-6} 与初始氮含量为 22.07×10^{-6} 的脱氮速率相差不大。随着钢液中初始氮含量的增加,钢液终点的氮含量也升高。但初始氮含量的高低对钢液的脱氮速率

影响不显著,进一步说明脱氮速率受碳氧反应强度控制。

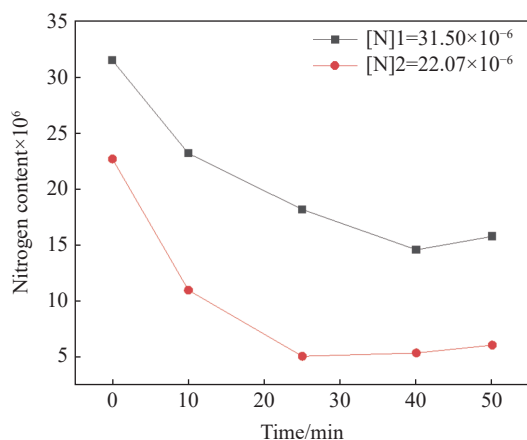


图4 不同初始氮含量下氮含量随时间的变化

Fig. 4 Variation of nitrogen content over time with different initial nitrogen levels

3 讨论

3.1 脱氮过程热力学分析

钢中氮的溶解行为遵循西华特定律^[18],其平衡溶解度主要由温度、气相氮分压以及钢液成分共同决定。为明确试验条件下钢液脱氮的热力学极限,基于表1所示的IF钢成分体系,利用热力学计算软件Factsage 8.2(Equilib模块,数据库选用FSstel、FSOxid和FactPS)计算了1600℃条件下钢液中氮含量随气相氮分压变化的平衡关系,其结果如图5所示。

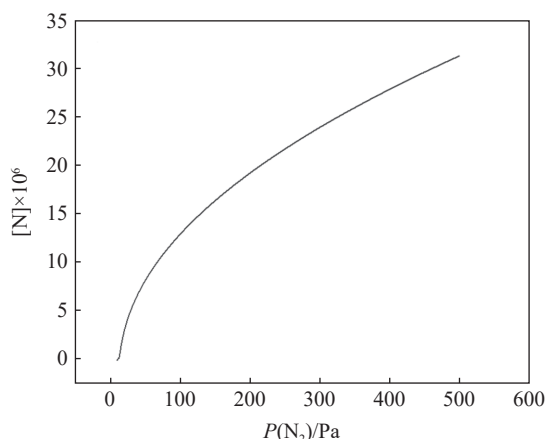


图5 氮溶解度随氮分压的变化

Fig. 5 Variation of solubility with nitrogen partial pressure

计算结果表明,随着气相氮分压的降低,钢液中氮的平衡溶解度显著下降。在试验所采用的真空条件(30 Pa)下,钢液中氮的热力学平衡溶解度约为 5.2×10^{-6} 。值得注意的是,该数值与高配碳量试验组

(1.500×10^{-6})中观测到的最低氮含量高度一致,表明在这组试验中,钢液中的氮含量已接近其热力学平衡极限。

3.2 脱氮动力学机理与控制环节分析

上述试验结果表明,碳氧反应强度是决定脱氮效率的主导因素。为深入揭示其内在机理,并建立脱碳与脱氮过程的定量关联,可以认为试验条件下,一部分碳氧反应在熔池表面发生,而大部分碳氧反应在熔池内部发生,钢液脱氮主要发生在CO气泡表面。脱氮过程由5个步骤组成^[19-20]:①N原子从钢液内部向液相边界层传质;②N原子穿过液相边界层向CO表面传质;③在CO表面发生界面化学反应, $2N=N_2$;④ N_2 穿过气相边界层向气相传质;⑤ N_2 离开气相边界层向CO气泡内部传质。CO气泡上的脱氮反应实际上就是气/液反应动力学过程。

Ono-Nakazato、Fruehan、Miyata、唱鹤鸣等人^[21-24]对真空条件下钢液的脱氮过程均进行过动力学理论计算讨论,一般认为真空条件下脱氮过程是一级反应、二级反应亦或是各反应之间的耦合。

当钢液中脱氮过程为一级反应时,表示如式(1)(2)所示。

$$\frac{d[\%N]}{dt} = -K_1 \frac{A}{V} ([\%N] - [\%N]_e) \quad (1)$$

$$Y_1 = -\ln \frac{[\%N] - [\%N]_e}{[\%N]_0 - [\%N]_e} \times \frac{V}{A} = K_1 t \quad (2)$$

当钢液中脱氮过程为二级反应时表示如式(3)(4)所示。

$$\frac{d[\%N]}{dt} = -K_c \frac{A}{V} ([\%N]^2 - [\%N]_e^2) \quad (3)$$

$$Y_2 = \frac{1}{2[\%N]_e} \times \left(\ln \frac{[\%N]_0 - [\%N]_e}{[\%N]_0 + [\%N]_e} - \ln \frac{[\%N] - [\%N]_e}{[\%N] + [\%N]_e} \right) \times \frac{V}{A} = K_c t \quad (4)$$

式中 Y_1 、 Y_2 为反应级数决定系数; A 为钢液的表面积,cm; V 为钢液的体积,cm³; K_1 表示一级反应时的脱氮速率常数,cm/s; K_c 表示二级反应时的脱氮速率常数,cm/(s·%); t 为时间,s;[%N]为钢液中氮的质量百分含量。

钢液的表面积和体积如式(5)(6)所示。

$$A = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \quad (5)$$

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (6)$$

式中: A 为钢液的表面积,cm²; V 为钢液的体积,cm³; d 为坩埚直径,试验中 $d=10.6$ cm; m 为钢样质量,试验中 $m=6.1$ kg; ρ 为钢液密度,取 7×10^{-3} kg/cm³。

将试验数据按照式(1)~(6)处理,取平衡氮含量 $[\%N]_e$ 为 5×10^{-6} ,得到 Y_1 、 Y_2 如图6、7所示。由

于 $1\,500 \times 10^{-6}$ 组在 40 min 后出现吸氮,对 40 min 与 50 min 的氮含量数据不做脱氮处理。

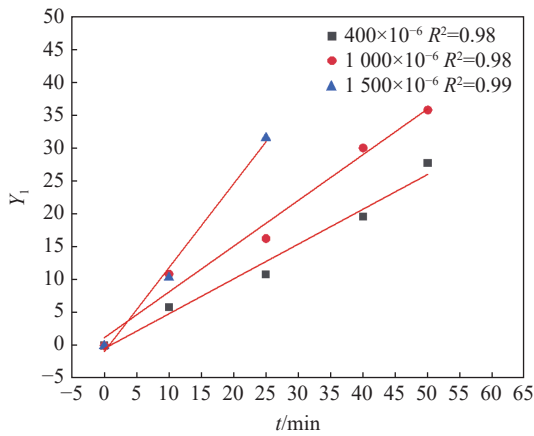


图6 一级反应动力学拟合曲线

Fig. 6 First-order reaction kinetic fitting curve

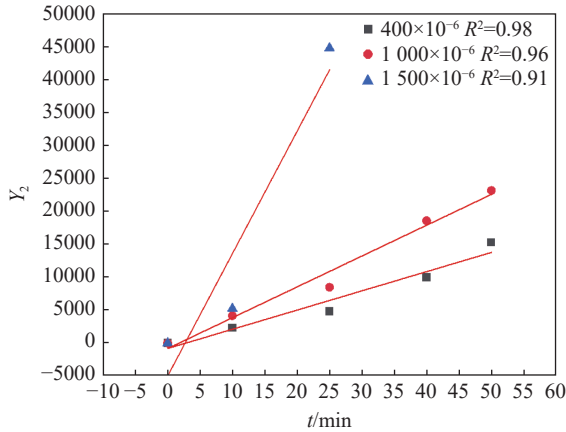


图7 二级反应动力学拟合曲线

Fig. 7 Second-order reaction kinetic fitting curve

由图6、7可知,根据一级反应的方程式对脱氮速率进行处理,可得出低、中和高碳试验组的液相传质速率常数 K_l 为 0.008 6、0.014、0.018 cm/s,计算得出的 Y_1 与 t 的线性拟合度很高, $R^2 > 0.98$; 而根据二级反应的方程式对脱氮速率进行处理,可得出低、中和高碳试验组界面化学反应的速率常数 K_c 为 4.08、7.00、19.29 cm/(s·%),高于现有文献 [13,25] 报道值 ($K_l=0.003\,5 \sim 0.007\,3$, $K_c=6 \sim 14$)。计算得出的 Y_2 与 t 的线性拟合度也较高, 400×10^{-6} 和 $1\,000 \times 10^{-6}$ 初始碳含量下, $R^2=0.96$, $1\,500 \times 10^{-6}$ 初始碳含量下, $R^2=0.91$ 。一级与二级反应动力学模型均能较好地描述试验数据 ($R^2 > 0.9$)。这表明在试验条件下,脱氮过程并非由单一的液相传质或界面化学反应步骤控制,而是处于两者共同影响的混合控制区。

为进一步揭示碳氧反应对脱氮过程的强化机制,基于以下主要假设建立了一个简化的物理模型: 1) 钢水充分混合; 2) 真空感应炉中脱碳反应发生在

钢液自由表面及钢液内部,总的脱碳效果为两者之和; 3) 真空感应炉脱氮反应仅在 CO 气泡表面; 4) 所有 CO 气泡等效为一系列平均尺寸的球形气泡; 5) 气-液界面的氮浓度与氮气的分压保持热力学平衡; 6) 脱碳速率受钢液侧碳和氧向反应界面传质的控制,脱氮速率受传质和界面反应共同的控制,见图8。

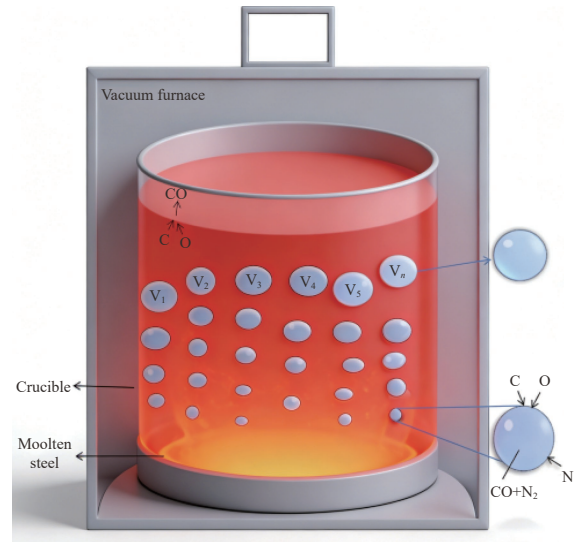


图8 内生气泡法脱氮示意

Fig. 8 Outline of decarburization and denitrification model

在钢液中,碳氧反应产生的 CO 气泡是脱氮 (N_2 析出) 的主要反应界面。假设气泡为球形,则表面积与体积的关系如式(7)所示。

$$A \propto V^{2/3} \quad (7)$$

气泡中 CO 的生成速率等于碳的消耗率^[26],如式(8)所示。

$$-\frac{dn_{[C]}}{dt} = \frac{dn_{CO}}{dt} \quad (8)$$

在恒温恒压下,CO 的物质的量生成速率直接决定了其体积生成速率。因此脱碳速率 $-d[\%C]/dt$ 决定了单位时间内生成的 CO 气体总体积 V ,见式(9)。

$$-\frac{d[\%C]}{dt} \propto V \quad (9)$$

在同一试验条件下的传质系数 β 与 $C_{[N]} - C_{[N]}^*$ ($C_{[N]}$ 表示钢液中 N 实际浓度, $C_{[N]}^*$ 表示钢液中平衡态 N 浓度) 相对稳定。在给定的浓度驱动力和传质条件下,脱氮速率 $-d[\%N]/dt$ 与气泡表面积 A 成正比,如式(10)所示。

$$-\frac{d[\%N]}{dt} \propto A \propto V^{2/3} \quad (10)$$

通过对式(7)(9)(10)进行整合,可以得到式(11)。

$$-\frac{d[\%N]}{dt} \propto \left(-\frac{d[\%C]}{dt} \right)^{2/3} \quad (11)$$

由式(11)可以得出,钢液内部脱氮速率与脱碳速率之间呈 2/3 次方的关系。

将各个时间段的脱碳速率与对应脱氮速率分别作图分析,拟合后得出在试验室条件下的脱碳速率与脱氮速率的经验关系如图 9 所示,拟合得到关系式为 $y=0.055x^{2/3}$, 如式(12)。

$$-\frac{d[\%N]}{dt} = 0.055 \left(-\frac{d[\%C]}{dt} \right)^{2/3} \quad (12)$$

可以看出实际数据拟合的关系式与理论分析是相吻合的,比例系数 $K=0.055$ 为一个综合的表现速率常数,这个常数与反应条件和熔池尺寸相关。

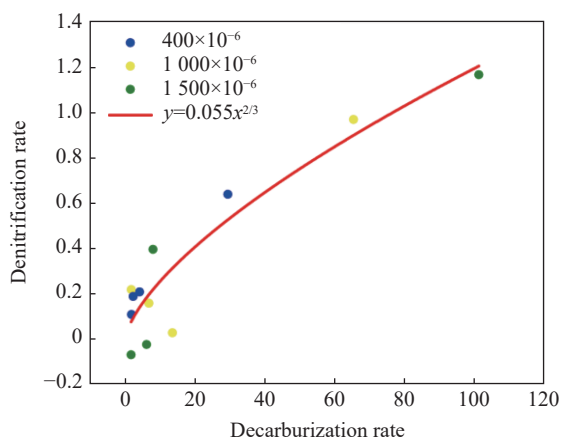


图 9 脱氮速率和脱碳速率关系

Fig. 9 Relationship between denitrification rate and decarburization rate

3.3 吸氮行为分析

试验结果显示,在高配碳量($1\,500 \times 10^{-6}$)条件下,当钢液氮含量降低至约 5×10^{-6} 后,随反应时间延长,氮含量出现了轻微回升现象(图 2)。结合前述热力学分析可知,该氮含量水平已非常接近 30 Pa 真空条件下的平衡溶解度(5.2×10^{-6}),表明此时钢液脱氮过程已进入超低氮区间,其控制机理与脱氮前期存在显著差异。

在脱氮反应前期,碳氧反应剧烈进行,钢液内部不断生成大量 CO 气泡,为脱氮提供了丰富的气-液反应界面,并降低了界面处的局部氮分压。在该阶段,脱氮过程主要受动力学控制,钢液中氮含量快速下降。然而,随着反应的推进,[C]与[O]持续消耗,碳氧反应逐渐减弱甚至停止,内生 CO 气泡数量显著减少,其“携带脱氮”效应随之消失^[27]。此时,钢液脱氮控制环节转变为与真空室的自由表面交换。

当钢液氮含量接近平衡溶解度时,脱氮反应的热力学驱动力趋近于零,体系处于高度敏感的动态平衡状态,在真空度轻微波动下,氮的传递方向可能发生逆转,表现为钢液从气相吸氮,从而导致钢液氮含量出现回升。

上述分析表明,在超低氮钢的冶炼过程中,单纯依靠延长处理时间并不能进一步降低钢液氮含量,反而可能因动力学强化作用的消失而引发吸氮风险。为实现稳定、可控的深度脱氮效果,在脱氮后期需维持较高真空度、降低环境氮分压,并尽量减少钢液裸露。

4 结论

1)真空耦合碳氧反应内生成的 CO 气泡能够有效脱除钢液中的氮。碳添加量为 400×10^{-6} 、 $1\,000 \times 10^{-6}$ 和 $1\,500 \times 10^{-6}$ 时,终点氮含量分别为 7.87×10^{-6} 、 6.43×10^{-6} 和 6.07×10^{-6} ,三组试验均能在 40 min 内将氮含量降至 10×10^{-6} 以下。

2)增强碳氧反应的强度可以加快脱氮速率、缩短脱氮时间。加入碳含量为 400×10^{-6} 和 $1\,000 \times 10^{-6}$ 时,将氮含量降至 10×10^{-6} 需 40 min 和 30 min;而碳加入量为 $1\,500 \times 10^{-6}$ 时,仅需 10 min 即可达到相同脱氮效果,脱氮效率大幅提升。

3)相同碳氧反应强度下,初始氮含量对脱氮速率无显著影响,说明碳氧反应强度是决定氮脱除效率的关键因素。但初始氮含量会影响终点氮含量,初始氮含量越高,终点氮含量越高。初始氮含量为 31.5×10^{-6} 、 22.07×10^{-6} 的钢液,终点氮含量分别为 15.8×10^{-6} 、 6.1×10^{-6} 。

4)动力学分析表明,真空耦合碳氧反应钢液的脱氮过程受液相氮传质与界面化学反应混合控制,试验条件下进行一级反应处理,得到反应速率常数 K_1 为 0.008 6、0.014、0.018 cm/s,二级反应处理得到反应速率常数 K_2 为 4.08、7.00、19.29 cm/(s·%)。试验条件下脱氮速率与脱碳速率的定量关系为 $-\frac{d[\%N]}{dt} = K \left(-\frac{d[\%C]}{dt} \right)^{2/3}$,其中表观常数 $K=0.055$,与熔池温度、炉内气氛、真空度、几何尺寸等工况参数相关。

5)脱氮后期碳氧反应减弱,尤其当氮含量降至超低水平后极易吸氮。为实现稳定深度脱氮需在脱氮后期严格控制真空度并避免钢液裸露,防止氮含量反弹。

参考文献

- [1] 王敏,张超杰,蔡小峰,等.超低碳铝镇静钢冶炼过程氮含量的控制[J].工程科学学报,2016,38(S1):219-223.
Wang Min, Zhang Chaojie, Cai Xiaofeng, et al. Nitrogen control of ultra-low-carbon Al-killed steel in a smelting process[J].

- Chin J Eng, 2016, 38(S1): 219-223.
- [2] 李小明, 席浩栋, 缪德军, 等. 炼钢流程钢中氮的溶解及控制技术[J]. 钢铁, 2021, 56(10): 36-44.
Li Xiaoming, Xi Haodong, Miao Dejun, et al. Nitrogen dissolution and control of molten steel in steelmaking process[J]. Iron Steel, 2021, 56(10): 36-44.
- [3] Chatterjee S, Rout B K. A comprehensive review of nitrogen control in the current and future green steelmaking operations[J]. Metall Mater Trans B, 2025, 56: 6093-6117.
- [4] 陈兆平, 田博涵, 蒋晓放, 等. 电弧炉低碳高效智能冶炼技术进步及展望[J]. 钢铁, 2024, 59(9): 167-183.
Chen Zhaoping, Tian Bohan, Jiang Xiaofang, et al. Progress and prospects of low-carbon high-efficiency and intelligent steelmaking technologies for electric arc furnaces[J]. Iron Steel, 2024, 59(9): 167-183.
- [5] 张伯影, 田博涵, 魏光升. 电弧炉炼钢流程氮含量变化及控制技术新进展[J]. 工业加热, 2020, 49(6): 19-24.
Zhang Boying, Tian Bohan, Wei Guangsheng. New process of nitrogen content change and control technology in EAF steelmaking process[J]. Industrial Heating, 2020, 49(6): 19-24.
- [6] 崔志峰, 上官方钦, 马文略, 等. 双碳背景下中国钢铁行业未来发展趋势探讨[J]. 工程科学学报, 2025, 47(4): 862-874.
Cui Zhifeng, Shangguan Fangqin, Ma Wenlue, et al. Discussion on the future development trend of China's iron and steel industry under the background of double carbon[J]. Chin J Eng, 2025, 47(4): 862-874.
- [7] 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.
Zhang Fujun. Fundamental research on new steelmaking process based on full scrap arc furnace[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [8] Kitamura T, Miyamoto K, Tsujino R. Mathematical model for nitrogen desorption and decarburization reaction in vacuum degasser[J]. ISIJ Int, 1996, 36(4): 395-401.
- [9] Najafabadi M A, Kanegawa S, Maeda M. Simultaneous decarburization and denitrogenization of molten iron with vacuum suction degassing method[J]. ISIJ Int, 1996, 36(10): 1229-1236.
- [10] 王润哲, 魏光升, 朱荣, 等. 电炉短流程高品质钢生产控氮技术探索与创新实践[J]. 钢铁, 2024, 59(9): 156-166.
Wang Runzhe, Wei Guangsheng, Zhu Rong, et al. Exploration and innovation practice of nitrogen control technology in short process high quality steel production of electric furnace[J]. Iron Steel, 2024, 59(9): 156-166.
- [11] 李层, 李欣, 魏光升, 等. 150 t 量子电弧炉 CO₂ 喷吹工艺的影响研究[J]. 炼钢, 2023, 39(6): 1-7.
Li Ceng, Li Xin, Wei Guangsheng, et al. Effect of CO₂ injection process on 150 t quantum electric arc furnace[J]. Steelmaking, 2023, 39(6): 1-7.
- [12] 姜周华, 武泽文, 陈兆平, 等. 电弧炉短流程生产低氮钢的技术进展[J]. 材料与冶金学报, 2025, 24(5): 426-452.
Jiang Zhouhua, Wu Zewen, Chen Zhaoping, et al. Technological advances in producing low nitrogen steel via electric arc furnace short process[J]. J Mater Metall, 2025, 24(5): 426-452.
- [13] Wu H J, Li Q Q, Wang Z, et al. Vacuum denitrification and nitrogen absorption of molten steel under ultra-low nitrogen conditions[J]. Materials Science and Technology, 2019, 35(2): 240-246.
- [14] 武文合. 炼钢过程底吹 CO₂ 技术的基础理论及应用研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
Wu Wenhe. Fundamental research and application of CO₂ bottom blowing technology in steelmaking process[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.
- [15] 傅杰. 钢液吸氮与脱氮动力学研究及其工业应用[C]//中国金属学会, 德国钢铁学会. 第二届中德(欧)冶金技术研讨会论文集. 北京科技大学; 2007: 116-121.
Fu Jie. Study on the kinetics of nitrogen absorption and denitrogenation in molten steel and its industrial application[C]//The Chinese Society for Metals, German Iron and Steel Institute. Proceedings of the Second Sino-German (European) Metallurgy Technology Symposium. University of Science and Technology Beijing; 2007: 116-121.
- [16] 袁保辉, 刘建华, 周海龙, 等. RH 强制脱碳与自然脱碳工艺生产 IF 钢精炼效果分析[J]. 工程科学学报, 2021, 43(8): 1107-1115.
Yuan Baohui, Liu Jianhua, Zhou Hailong, et al. Refining effect of IF steel produced by RH forced and natural decarburization process[J]. Chin J Eng, 2021, 43(8): 1107-1115.
- [17] 吴宝国, 董元旻, 周云, 等. 氮的溶解度及预处理过程脱氮的实验研究[J]. 工程科学学报, 2004, 26(2): 125-129.
Wu Baoguo, Dong Yuanchi, Zhou Yun, et al. Experimental study on nitrogen solubility in molten iron and denitrification during hot metal pretreatment[J]. Chin J Eng, 2004, 26(2): 125-129.
- [18] 王书桓, 郭建龙, 赵定国. 影响 Cr12N 高氮钢中氮含量的因素研究[J]. 钢铁钒钛, 2014, 35(4): 94-97.
Wang Shuhuan, Guo Jianlong, Zhao Dingguo. Study on influencing factors of N content in Cr12N high nitrogen steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2014, 35(4): 94-97.

- [15] 王广连, 朱荣, 申景霞, 等. 20CrMnTi 渗碳齿轮钢中 Ti(C, N) 的粗化行为[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(S1): 182-184.
Wang Guanglian, Zhu Rong, Shen Jingxia, et al. Ostwald ripening of Ti (C, N) in 20CrMnTi gear steels[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(S1): 182-184.
- [16] Chen Chihyuan, Liao Menghsuan. Synergistic effects of carbon content and Ti/Mo ratio on precipitation behavior of HSLA steel: Insights from experiment and critical patent analysis[J]. Materials & Design, 2020, 186: 108-361.
- [17] Wang Zhenqiang, Sun Xinjun, Yang Zhigang, et al. Effect of Mn concentration on the kinetics of strain induced precipitation in Ti microalloyed steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 561: 212-219.
- [18] Mukherjee S, Timokhina I, Zhu Chen, et al. Clustering and precipitation processes in a ferritic titanium-molybdenum microalloyed steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 690: 621-632.
- [19] 胡继康, 殷立涛, 周玉成, 等. 二次固溶处理对低温用马氏体时效钢组织与力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2025, 46(9): 133-141.
Hu Jikang, Yin Litao, Zhou Yucheng, et al. Effect of secondary solution treatment on microstructure and mechanical properties of maraging steel for low temperature application[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2025, 46(9): 133-141.
- [20] Wang Yi, Che Zhichao, Chen Yufeng, et al. Influence mechanism of solution temperature on microstructure evolution and tensile properties of Ti microalloyed high strength steel CGLC700[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 2936-2944.
- [21] Liu Tao, Long Mujun, Chen Dengfu, et al. Effect of coarse TiN inclusions and microstructure on impact toughness fluctuation in Ti micro-alloyed steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25(10): 1043-1053.
- [22] Duan Haojian, Zhang Ying, Ren Ying, et al. Distribution of TiN inclusions in Ti-stabilized ultra-pure ferrite stainless steel slab[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2019, 26(9): 962-972.

编辑 邓淑惠

(上接第 91 页)

- [19] 李洪桂. 冶金原理 (第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Li Guihong. Principles of metallurgy. 2nd ed[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [20] 战东平, 邱国兴, 牛奔, 等. 氮在钢液中溶解的热力学及动力学研究[J]. 炼钢, 2015, 31(5): 7-11.
Zhan Dongping, Qiu Guoxing, Niu Ben, et al. Thermodynamics and kinetics research of nitrogen dissolution in steel[J]. Steelmaking, 2015, 31(5): 7-11.
- [21] Ono-Nakazato H, Matsui A, Miyata D, et al. Effect of aluminum, titanium or silicon addition on nitrogen removal from molten iron[J]. ISIJ int, 2003, 43(7): 975-982.
- [22] Ono-Nakazato H, Usui T, Morisawa S. Rate of nitrogen desorption from CaO-Al₂O₃ melts to gas phase[J]. Metall Mater Trans B, 2002, 33(3): 393-401.
- [23] Fruehan R J, Goldstein D, Sarma B, et al. Recent advances in the fundamentals of the kinetics of steelmaking reactions[J]. Metall Mater Trans B, 2000, 31(5): 891-898.
- [24] 唱鹤鸣, 陈伯平, 陈梓庆, 等. 熔渣下钢液真空脱氮动力学[J]. 工程科学学报, 1996, 18(6): 505-508.
Chang Heming, Chen Boping, Chen Ziqing, et al. Kinetics of vacuum denitrogenation from steel using fluxes[J]. Chin J Eng, 1996, 18(6): 505-508.
- [25] Niu J P, Yang K N, Sun X F, et al. Denitrogenation during vacuum induction melting refining Ni base superalloy using CaO crucible[J]. Mater Sci Tech Ser, 2002, 18(9): 1041.
- [26] 郭汉杰. 冶金物理化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021.
Guo Hanjie. Physical chemistry of metallurgy[M]. Beijing: Higher Education Press, 2021.
- [27] 彭飞, 王立辉, 张庆宇, 等. 电弧炉冶炼超低碳汽车用钢的工艺实践[J]. 炼钢, 2024, 40(4): 74-79.
Peng Fei, Wang Lihui, Zhang Qingyu, et al. Process practice of smelting ultra-low carbon automobile steel by the electric arc furnace[J]. Steelmaking, 2024, 40(4): 74-79.

编辑 唐肖