

连铸时超低碳钢结晶器内钢液增碳的研究

刘承军 王德永 史培阳 闵 义 姜茂发
(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘 要 通过理论解析和实验测定, 研究不同类型和配入量的碳质材料的连铸保护渣对 0.003% C 超低碳钢连铸结晶器(200 mm × 100 mm)内钢液增碳的影响。结果表明, 铸坯速度 2.0 m/min 在稳态浇注条件下, 超低碳钢连铸结晶器内钢液增碳量仅为 $(1.2 \sim 2.4) \times 10^{-6}$; 在非稳态浇注时期, 钢液最大增碳量达 67.9×10^{-6} 。保护渣的 3 种配加碳质材料中, 石墨对结晶器内钢液增碳量影响最大, 炭黑次之, 活性碳最小。随着渣中碳质材料配入量的增加, 钢液增碳量增大。

关键词 增碳 连铸保护渣 超低碳钢

A Study on Carbon Pick-up in Ultra Low Carbon Molten Steel in Mold during Continuous Casting

Liu Chengjun, Wang Deyong, Shi Peiyang, Min Yi and Jiang Maofa
(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract The effect of mold powder with different type and addition of carbon materials on carbon pick-up in 0.003% C ultra low carbon molten steel in 200 mm × 100 mm mold has been studied by theoretical calculation and experimental measurement. The results showed that with casting rate 2.0 m/min, on steady condition of continuous casting, the carbon pick-up content in steel was $(1.2 \sim 2.4) \times 10^{-6}$, and on non-steady condition of continuous casting, the maximum carbon pick-up content in steel was 67.9×10^{-6} . In 3 kinds of addition carbon materials the carbon pick-up content in molten steel in mold added graphite was highest, added carbon black next and added active carbon lowest; and with increasing the amount of carbon materials addition in powder, the carbon pick-up content in steel increased.

Material Index Carbon Pick-up, Continuous Casting Mold Powder, Ultra Low Carbon Steel

连铸保护渣一般采用碳质材料作为骨架粒子, 控制其熔化速度和熔化结构。在超低碳钢的连铸生产过程中, 连铸保护渣中的碳质材料进入钢液中, 引起结晶器内钢液增碳, 从而造成铸坯质量恶化^[1,2]。关于超低碳钢连铸结晶器内钢液增碳, 国内外的研究工作主要集中于现场的试验数据分析和铸坯金相分析, 具有一定的局限性。而且, 由于现场连铸工艺条件的差异, 实验所得的结果各不相同^[3,4]。

本实验通过理论解析与实验测定, 研究在不同碳质材料的类型和配入量条件下连铸保护渣对超低碳钢连铸结晶器内钢液增碳的影响, 探究超低碳钢连铸结晶器内钢液增碳的发生条件。

1 超低碳钢连铸结晶器内钢液增碳的理论解析

在连铸生产过程中, 结晶器内碳由熔渣层向钢液中扩散, 根据双膜传质理论^[5], 可以求出在高温条件下渣钢界面上碳的扩散传质通量为:

$$j_c = \frac{c_s - Lc_m}{\frac{1}{k_s} + \frac{L}{k_m}} \quad (1)$$

式中: j_c -碳的传质通量/ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; k_s -碳在熔渣相一侧的传质系数/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; k_m -碳在钢液相一侧的传质系数/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; c_s -碳在熔渣相中的浓度/ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$; c_m -碳在钢液相中的浓度/ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$; L -碳在渣钢界面两侧的浓度分配比。

对于渣钢界面两侧流体^[6], L 与渣钢界面上碳的溶解反应有关。

可用下式表示超低碳钢连铸结晶器内的钢液增碳量:

$$\Delta m_c = \frac{M_c \cdot j_c}{V_c \cdot \rho_m} \quad (2)$$

式中: Δm_c -钢液增碳量/ 10^{-6} ; M_c -碳的摩尔质量/ $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$; V_c -浇注速度/ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$; ρ_m -钢液密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

已知超低碳钢和连铸保护渣的理化性能(表 1)^[6,7],当铸坯速度分别为 1.0,1.5,2.0 m/min 时,可以求出超低碳钢连铸结晶器内钢液增碳的理论计算值,参见图 1。

表 1 钢液和熔渣的理化性能

Table 1 Physical and chemical properties of molten steel and slag

类别	密度/ kg·m ⁻³	粘度/ Pa·s	碳的扩散系数/ m ² ·s ⁻¹	碳的传质 系数/m·s ⁻¹
钢液	7.2×10 ³	2.5×10 ⁻³	1.0×10 ⁻⁴ ~ 1.0×10 ⁻⁵	1.02×10 ⁻²
熔渣	3.5×10 ³	2.0×10 ⁻²	1.0×10 ⁻⁶ ~ 1.0×10 ⁻⁷	1.00×10 ⁻⁴

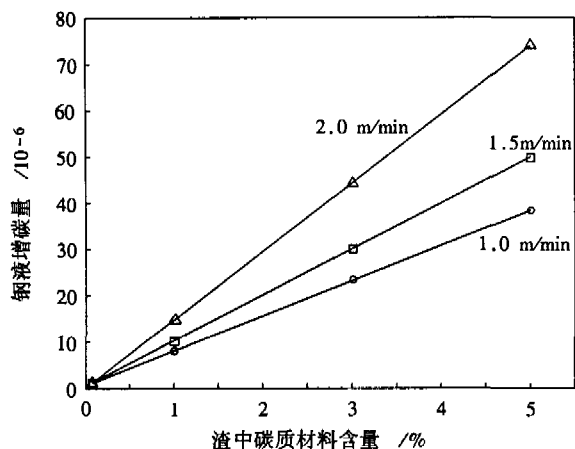


图 1 不同铸坯速度连铸超低碳钢结晶器内钢液增碳的理论计算

Fig. 1 Theoretical calculation for carbon pick-up in ultra low carbon molten steel in mold during continuous casting with different casting speed

由图 1 可知,随着渣中碳质材料含量的增加,超低碳钢连铸结晶器内钢液增碳量逐渐增大。在稳态浇注条件下,结晶器钢液弯月面上方为熔渣层,熔渣中的碳含量为 0.10% ~ 0.20%,熔渣中的碳通过扩散进入钢中,导致结晶器内钢液增碳,当浇注速度分别为 1.0,1.5,2.0 m/min 时,钢液增碳量分别对应为 $(0.8 \sim 1.5) \times 10^{-6}$ 、 $(1.0 \sim 1.9) \times 10^{-6}$ 、 $(1.5 \sim 2.9) \times 10^{-6}$ 。在非稳态浇注时期,钢液与粉渣层直接接触,粉渣中的碳含量为 1.0% ~ 5.0%,产生结晶器内钢液增碳,当浇注速度分别为 1.0,1.5,2.0 m/min 时,钢液增碳量分别对应为 $(7.3 \sim 36.5) \times 10^{-6}$ 、 $(9.7 \sim 48.6) \times 10^{-6}$ 、 $(14.6 \sim 72.9) \times 10^{-6}$ 。

2 超低碳钢连铸结晶器内钢液增碳的实验测定

2.1 实验方法

2.1.1 渣料准备

实验采用两种渣料,即“粉渣”和“熔渣”。熔渣的钢液增碳实验可以模拟在稳态浇注条件下钢液与熔渣层接触时的钢液增碳过程,粉渣的钢液增碳实验可以模拟在非稳态浇注时期钢液与粉渣层直接接触时的钢液增碳过程。

粉渣由预熔基料配加碳质材料而成,碳质材料有碳黑、石墨、活性炭 3 种类型,其物性参数及配入量如表 2 所示。

表 2 保护渣中碳质材料的物性参数及配入量

Table 2 Physical properties and added content of carbon materials in mold powder

材料	密度/ kg·m ⁻³	比表面积/ m ² ·g ⁻¹	着火点/ ℃	配入量/ %
碳黑	1 920	110 ~ 130	634	1.0,3.0,5.0
石墨	2 240	6 ~ 9	825	1.0,3.0,5.0
活性炭	2 020	500 ~ 1 000	593	1.0,3.0,5.0

熔渣由粉渣通过在模拟结晶器中高温处理来获取,粒度小于 0.147 mm。通过化学分析,可以测定熔渣的实际碳含量。在本实验条件下,熔渣的含碳量波动于 0.10% ~ 0.20%,这与 Takeuchi^[3]的研究成果相一致。研究发现,熔渣的含碳量变化主要与碳质材料的类型有关,而与粉渣的含碳量无关。活性炭的着火点温度低、氧化速度快,熔渣中碳含量最小;石墨的着火点温度高、氧化速度慢,熔渣中碳含量最大;碳黑居中。

2.1.2 钢料准备

实验用超低碳钢的碳含量为 0.003%,成分如表 3 所示。

表 3 超低碳钢的化学成分/%

Table 3 Chemical composition of ultra low carbon steel /%

C	Si	Mn	P	S	N	O	Al	Ti
0.003	0.12	0.25	0.080	0.004	< 0.005	< 0.010	< 0.002	< 0.003

2.1.3 实验过程

在一定的温度条件下,向模拟结晶器(200 mm × 100 mm)内钢液表面加入一定量的渣料,1 570 ℃恒温一定时间。改变实验条件,研究碳质材料的类型和配入量对超低碳钢连铸结晶器内钢液增碳的影响。

2.2 实验结果与分析

2.2.1 浇注工艺稳态与否对超低碳钢连铸结晶

器内钢液增碳的影响

浇注工艺稳态与否对于超低碳钢连铸结晶器内钢液增碳的影响作用如图 2 所示。由图 2 可知,当铸坯速度为 2.0 m/min 时,在稳态浇注工艺条件下,钢液与熔渣相接触,超低碳钢的钢液增碳量很小,仅为 $(1.2 \sim 2.4) \times 10^{-6}$;在非稳态浇注工艺条件下,由于结晶器内钢液紊流和液面波动,钢液与粉渣直接接触,超低碳钢的钢液增碳量较大,最大增碳量达 67.9×10^{-6} 。

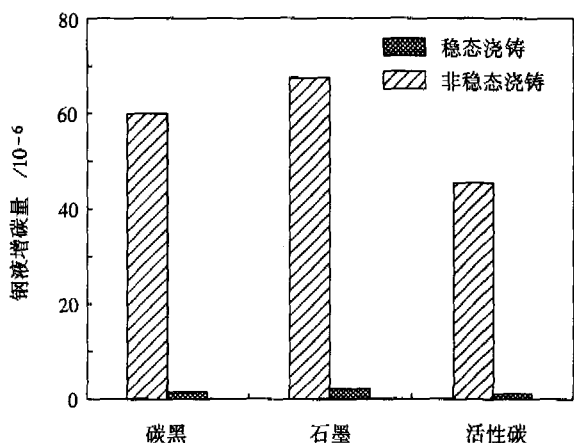


图 2 保护渣 3 种配加碳质材料为石墨、炭黑和活性炭时,稳态与非稳态浇注超低碳钢连铸结晶器内钢液增碳的对比

Fig. 2 With 3 kinds of adding carbon materials-graphite, carbon black and active carbon in powder, comparison of carbon pick-up in ultra low carbon molten steel in mold in steady and non-steady continuous casting

2.2.2 渣中碳质材料类型和配入量对超低碳钢连铸结晶器内钢液增碳的影响

连铸保护渣中碳质材料的类型和配入量对超低碳钢连铸结晶器内钢液增碳影响显著。由图 3 可知,石墨对钢液增碳量影响最大,炭黑次之,活性炭最小。随着渣中碳质材料含量的增加,超低碳钢连铸结晶器内的钢液增碳量也随之增大。

3 结论

(1) 在稳态浇注条件下,超低碳钢连铸结晶器内的钢液增碳量很小,为 $(1.2 \sim 2.4) \times 10^{-6}$;在非稳态浇注时期,钢液增碳量较大,最大增碳量达 67.9×10^{-6} 。

(2) 超低碳钢连铸结晶器内钢液增碳与连铸

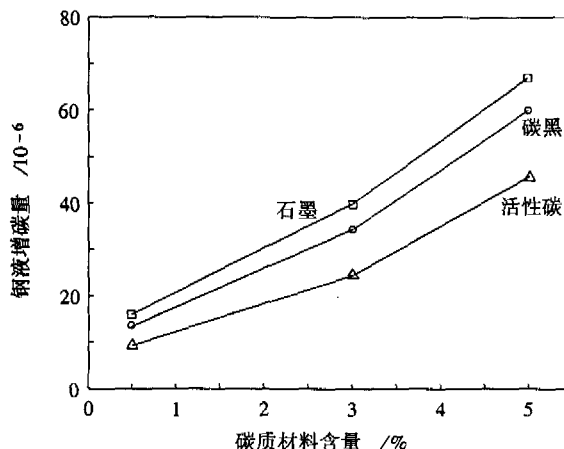


图 3 碳质材料的类型和配入量对超低碳钢连铸结晶器内钢液增碳的影响

Fig. 3 Effect of type and content of carbon materials in powder on carbon pick-up in ultra low carbon molten steel in mold during continuous casting

保护渣中碳质材料的类型和配入量有关。保护渣中配加石墨时,结晶器内钢液增碳量最大,炭黑次之,活性炭最小。随着渣中碳质材料配入量的增加,钢液增碳量也随之增大。

本课题为国家自然科学基金资助项目(50204005 和 50374029)

参考文献

- 1 Bommaraju R. Optimum Selection and Application of Mold Fluxes for Carbon Steels. ISS. Steelmaking Conference Proceedings. Washington: ISS. 1991, 74: 131
- 2 Nakato H, Takeuchi S, Fujii T, et al. Characteristics of New Mold Fluxes for Strand Casting of Low and Ultra Low Carbon Steel Slabs. ISS. Steelmaking Conference Proceedings. Washington: ISS. 1991, 74: 639
- 3 Takeuchi H, Mori H, Nishida T, et al. Development of a Carbon-free Casting Powder for Continuous Casting of Steels. ISIJ. 1979, 19: 274
- 4 Skoczylas G. ISS. Recent Developments in High Viscosity Mold Powders for TISULC Steel Grades. ISS. Steelmaking Conference Proceedings. Pittsburgh: ISS. 1996, 79: 269
- 5 郭鸿志,张欣欣,刘向军,等.传输过程数值模拟.北京:冶金工业出版社,1998
- 6 毛裕文.冶金熔体.北京:冶金工业出版社,1994
- 7 曲英.炼钢学原理.北京:冶金工业出版社,1980

刘承军(1974-),男,博士,副教授,2001年东北大学毕业。从事连铸工艺及理论研究。

收稿日期:2005-12-01