

· 试验研究 ·

板坯连铸结晶器保护渣性能的高拉速适用性研究

朱立光 韩毅华 赵俊花

(河北理工大学冶金与能源学院,唐山 063009)

摘要 试验研究了唐山不锈钢厂 180~200 mm 板坯连铸使用的成分(%)分别为 56~58 黄长石、25~27 硅灰石、4~5 枪晶石、10~12 玻璃相和 20~22 黄长石、78~80 玻璃相两种结晶器保护渣的理化特性、结晶相结构及渣液的化学成分、熔化温度和液渣层的厚度。结果表明,在拉速 ≥ 1.5 m/min时,为使保护渣在结晶器内保持“全程液态润滑”,保护渣的熔化温度应 ≤ 1049 °C,熔化速度控制在 (34 ± 2) s;最佳熔渣层厚度为 10~15 mm,渣子粘度为 0.19 Pa·s。

关键词 连铸板坯 结晶器保护渣 高拉速 适用性

A Study on Applicability of Mold Flux Properties for Slab High Speed Concasting

Zhu Liguang, Han Yihua and Zhao Junhua

(School of Metallurgy and Energy Resources, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009)

Abstract The physical and chemical properties, and structure of crystallizing phases of two kinds of flux - 56~58 melilite, 25~27 grammite, 4~5 lance spar, 10~12 glass phase and 20~22 melilite, 78~80 glass phase, and ingredient, melting temperature and thickness of liquid slag layer used for 180~200 mm slab casting at Tangshan stainless steel mill have been tested and studied. Results showed that as casting speed ≥ 1.5 m/min, in order to make the flux maintains “whole course liquid lubrication” in mold, the melting temperature of flux should be ≤ 1049 °C with controlling melting speed (34 ± 2) s; and the optimum thickness of liquid slag layer is 10~15 mm with slag viscosity 0.19 Pa·s.

Material Index Slab Concasting, Mold Flux, High Speed Casting, Applicability

唐山不锈钢厂 2 号连铸机自投产以来,拉速一直较低,随着 4 号高炉的投产和 1 号转炉的扩容改造,低拉速水平下的 2 号连铸机就成为不锈钢厂产能提高的瓶颈。因此,迫切需要提高 2 号连铸机的拉速。而随着拉速的提高,导致结晶器粘结漏钢等一系列问题的发生,经排除试误分析,这与连铸用保护渣的性能有很大的关系,因此,本文研究了保护渣性能对高拉速的适应性。

1 高速板坯连铸的特点及其连铸保护渣应具备的理化性能

由于拉速的提高,造成了高速板坯连铸技术的两大难题——漏钢和铸坯缺陷^[1],为解决这两大难题,必须重视高拉速板坯连铸保护渣的开发。因此,要求保护渣^[2,3]:(1)提供适宜的渣耗量;(2)维持充分的液渣深度,以抵消液面波动及保证结晶器上升期边缘有液渣存在;(3)随 Al₂O₃ 等夹杂的吸收及温度环境的变化,保护渣的特性变化很小,同时在拐点温度以上,粘度也应随温度变化相当平缓;(4)控制结晶器的横向和纵向传热。纵向要求保护渣有良好的绝热特性,横向根据钢种要求控制传热均匀适中;

(5)适宜的析晶能力。以满足某些钢种控制热流的要求(如中碳钢等)。

高速板坯连铸用保护渣应具有以下理化特性^[2,4]:(1)低粘度,通常板坯拉速 ≥ 1.5 m/min时,粘度在 0.01~0.15 Pa·s 范围内;拉速 < 1.5 m/min 时,粘度值在 0.1~1.0 Pa·s 范围内;(2)低熔化温度和较高的熔化速度,熔渣层厚度在 10~30 mm 能够满足板坯连铸高拉速的要求;(3)良好的绝热特性;(4)良好的夹杂吸收能力并保持吸收后熔渣性能稳定;(5)适宜的析晶率和析晶温度。

2 高速板坯连铸工艺参数、保护渣成分和实验方法

唐山不锈钢厂 2 号连铸机连铸工艺参数如表 1;取唐山不锈钢厂板坯(Q195 钢)连铸现行保护渣成品渣样,渣样的化学成分如表 2。

采用全自动炉渣熔点熔速测定仪对现行保护渣熔化温度进行研究。应用试样变形法测定试样变形量与温度的关系,其中试样开始变形时即试样高度降为原高度的 5/6 时的温度定为初始熔化温度,试样高度降为原高度的 1/2 呈半球形时的温度定为半球点温度,即保护渣的熔化温度,试样全部变为液体时即渣柱高度降为原高度的 1/3 时的温度定为流动温

表 1 板坯连铸工艺参数
Table 1 Parameters of slab Concasting process

连铸机	结晶器有效长度/mm	铸坯断面尺寸/(mm × mm)	生产钢种	结晶器水量/(L · min ⁻¹)		结晶器进出水温度差/℃		对应不同断面拉速/(m · min ⁻¹)	浇铸温度/℃
				宽面	窄面	宽面	窄面		
2 号	900	200 × 1 550 200 × 1 250 180 × 1 500 180 × 1 020	SPHC、 Q235B、 Q195 等	4 000	510	5	5	1.2, 1.4, 1.5 1.35, 1.5, 1.6 1.35, 1.45, 1.55 1.5, 1.7, 1.8	1 550

表 2 现行 2 种结晶器保护渣的组成
Table 2 Ingredient of two mold fluxes using at present

保护渣样	化学成分/%												碱度(R)
	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	F ⁻	C _固	H ₂ O	B ₂ O ₃	Li ₂ O	
051230	32.95	30.44	10.7	2.88	3.12	0.47	0.62	7.22	2.88	0.3	-	-	0.92
070612061	30.60	29.86	9.08	3.41	6.12	-	-	5.84	5.68	-	2.84	1.26	0.976

度。而熔化速度则定义为 1 350 ℃ 恒温下渣样完全熔化所需的时间^[5], 测量时室温为 27 ℃。

3 实验结果及分析

3.1 结晶器保护渣的熔化和粘度特性的测定和计算

表 3 为 051230 型和 070612061 型保护渣样熔化温度、熔化速度的实验结果和根据经验公式^[6]计算的保护渣粘度。其熔化温度分别为 1 074 ℃ 和 976.5 ℃。图 1 为 2 种保护渣样熔化过程中开始熔化温度、半球点温度、流动温度视图。

表 3 2 种保护渣测定的熔化温度、熔化速度和计算的粘度
Table 3 Measured melting temperature, melting speed and calculated viscosity of two mold fluxes

保护渣样	温度/℃			熔化速度/s	粘度 η/(Pa · s)
	初始熔化	半球点	流动		
051230	1 027.0	1 074.0	1 082.0	38	0.27
070612061	942.5	976.5	999.5	28	0.19

从表 3 可以看出, 051230 型保护渣熔化温度较高, 070612061 型较低。经现场测定, 051230 型液渣层为 8 ~ 9 mm, 070612061 型液渣层为 12 ~ 13 mm。因此, 结合现场工艺参数和高拉速下保护渣理论来看, 这 2 种保护渣都不能很好满足要求, 需要将其熔



图 1 2 种保护渣熔化过程
Fig. 1 Melting process of two mold fluxes

化温度控制在一个合理的范围。

051230 型保护渣熔化速度较慢, 070612061 型较快。保护渣应具有较快的熔化速度, 以保持足够的熔渣层厚度, 满足渣膜消耗的需要。但保护渣的熔速并非越快越好, 熔速太快势必影响保护渣的保温性能, 容易形成冷皮和造成皮下夹渣多等缺陷。因此, 保护渣的熔速以保持适宜的熔渣层厚度为宜^[7,8]。

3.2 保护渣结晶相

取渣膜样, 测得 2 种保护渣的结晶相组成如表 4。由表 4 可以看出, 051230 型保护渣结晶矿物主要有黄长石、硅灰石、枪晶石和玻璃相, 且结晶粒度差别较大; 而 070612061 型结晶矿物只有黄长石和玻璃相, 且玻璃相占大部分。图 2 显示了 2 种保护渣中的结晶矿相形貌。

表 4 2 种保护渣的结晶相组成及体积百分含量/%
Table 4 Ingredient and volume fraction of two mold fluxes /%

保护渣样	黄长石	硅灰石	枪晶石	玻璃相
051230	56 ~ 58	25 ~ 27	4 ~ 5	10 ~ 12
070612061	20 ~ 22	-	-	78 ~ 80

3.3 结晶器内保护渣的结构和成分

在现场首先测定结晶器内保护渣的 3 层厚度, 然后分别取现行 2 种保护渣的初始液渣、1 h 后的液渣、2 h 和 3 h 后的液渣, 将其在空气中自然冷却。现场测得结晶器内保护渣各层厚度如表 5。板坯连铸保护渣的熔渣层厚度应控制在

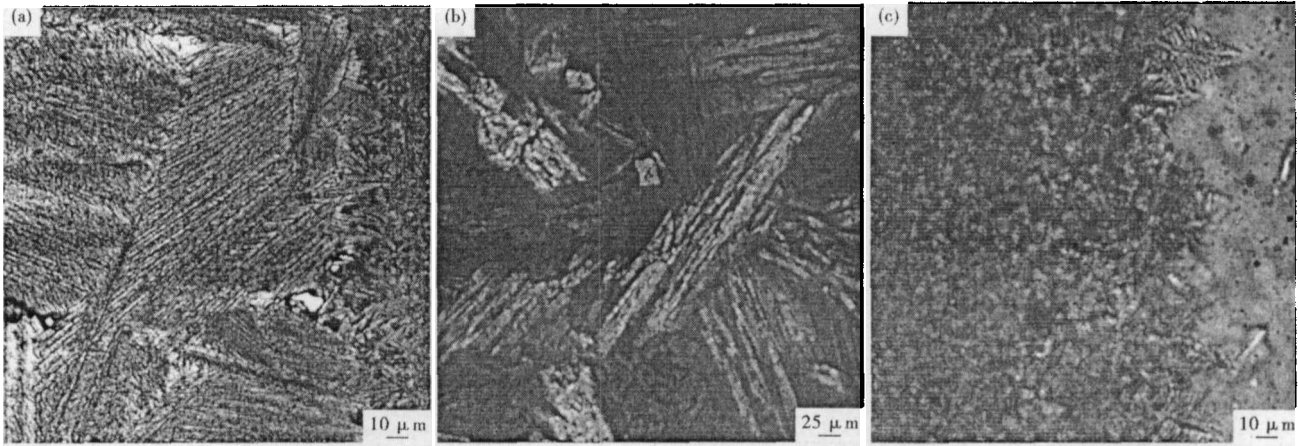


图 2 051230 保护渣中芭蕉状、羽毛状黄长石(a)和长柱状硅灰石和菱形枪晶石(b);070612061 保护渣中黄长石雏晶和细小黄长石、左边为结晶器侧(c)

Fig. 2 Musa form and featheriness form melilite (a) and long column form grammite and rhombus lance spar (b) in mold flux 051230; Crystallite of melilite and fine melilite in mold flux 070612061, left- mold side (c)

表 5 结晶器内 2 种保护渣未熔层、过渡层和熔渣层的厚度
Table 5 Thickness of non-melting layer, transition layer and liquid slag layer of two fluxes in mold

保护渣样	未熔层厚度/ mm	烧结层和过渡层 厚度/mm	熔渣层厚度/ mm
051230	34	15	8 ~ 9
070612061	14	14	12 ~ 13

10 ~ 30 mm, 因此, 可以看出 070612061 型保护渣的熔渣层厚度符合要求, 而 051230 型保护渣的熔渣层厚度薄一些。

采用能谱仪对 2 种液渣进行化学成分测定, 并用全自动炉渣熔点熔速测定仪测定烘干渣样的熔化温度(表 6)。由表 6 可见, 前 2 h 内 2 种液渣的 Al_2O_3 含量变化趋势都是先降低再升高的, 往后 1 h 内, 051230 型液渣的 Al_2O_3 含量开始减少, 而 070612061 型液渣的 Al_2O_3 含量稍微开始增加, 但增加幅度很小。

表 6 2 种保护渣液渣中 Al_2O_3 含量和熔化温度
Table 6 Content of Al_2O_3 in liquid slag and melting temperature of two mold fluxes

时间/h	Al_2O_3 /%		熔化温度/℃	
	051230	070612061	051230	070612061
初始渣液	7.23	7.97	1 015.0	959.5
1	6.22	5.79	999.5	1 070.5
2	6.41	6.23	1 022.5	981.0
3	5.79	6.25	1 014.0	1 025.0

3.4 保护渣液渣的熔化温度和渣耗量的分析

由表 6 可见, 这 2 种液渣的熔化温度随时间变化的趋势正好相反, 并且 070612061 型液渣的熔化温度变化率比 051230 型液渣大, 这可能是加入了

Li_2O 和 B_2O_3 的原因。此外, 在测定 2 种液渣的熔化温度实验中发现, 051230 型液渣试样在加热中有向上升高的现象, 这说明此液渣中可能存在碳酸盐物质, 随着温度的升高产生了气泡; 而 070612061 型液渣试样在加热到一定高温时, 试样突然塌落, 说明其熔化温度范围太窄, 不利于高速板坯连铸。

连铸采用保护渣浇铸技术, 保护渣的消耗量是评价保护渣润滑性能的重要指标, 通常用 $kg/t_{\text{钢}}$ 或 kg/m^2 来表示。

至今已有很多人对于连铸过程中的保护渣消耗量做了大量的研究, 通过实验测试或理论推导, 得出了许多关于保护渣消耗量的计算公式, 为生产实验提供了参考和依据。文献[9]提出了渣耗量的回归方程(1):

$$Q_s = 0.74 \left(\frac{1}{A^{0.3}} \right) \left(\frac{60}{f} \right) (10\eta V^2)^{-0.5} + 0.17 \quad (1)$$

式中: Q_s - 保护渣的消耗量/($kg \cdot m^{-2}$); V - 拉速/($m \cdot min^{-1}$); A - 振幅/mm; f - 频率/Hz; η - 1 300 °C 时的粘度/($Pa \cdot s$)。

根据现场工艺参数可得到: 拉速 $V_c = 1.4 \sim 1.8$ m/min; 粘度 $\eta_{051230} = 0.27 Pa \cdot s$ 、 $\eta_{070612061} = 0.19 Pa \cdot s$; $f = 122.5 \sim 157.5$ Hz; 振幅 $A = 8$ mm, 代入式(1)得到 $Q_{S051230} = 0.22 \sim 0.25 kg/m^2$ 、 $Q_{S070612061} = 0.23 \sim 0.27 kg/m^2$, 而满足低碳钢润滑要求的最小渣耗量为 $0.3 kg/m^2$, 因此两者都不能很好满足渣耗的要求。

4 高速板坯连铸保护渣性能的适用性研究

结合高速板坯连铸保护渣应具备的理化性能,

对现行保护渣进行适用性分析:

(1) 粘度。高速板坯连铸保护渣应具备低粘度的特点,当板坯拉速 ≥ 1.5 m/min时,粘度在 $0.01 \sim 0.15$ Pa·s范围内;拉速 < 1.5 m/min时,粘度值在 $0.1 \sim 1.0$ Pa·s范围内。由公式计算出 051230 型保护渣的粘度为 0.27 Pa·s,070612061 型保护渣粘度为 0.19 Pa·s,可以看出,后者能够适用高速连铸,而前者粘度偏高。

(2) 熔化温度和熔速。高速板坯连铸保护渣应具备低熔化温度和高熔化速度的特点,一般认为,熔渣层厚度在 $10 \sim 30$ mm 能够满足板坯连铸高拉速的要求。而实验测得 051230 型保护渣的熔化温度为 1074 °C,熔速为 38 s;070612061 型保护渣的熔化温度为 976.5 °C,熔速为 28 s,可以看出前者熔化温度偏高,熔速较低,不能满足高速连铸的要求;后者熔化温度偏低,熔速较高,但也不能满足要求,因为熔点太低、熔速太快,势必影响保护渣的保温性能,容易造成冷皮和皮下夹渣多等缺陷,因此熔速以保持适宜的熔渣层厚度为宜。

现场测得,051230 型保护渣熔渣层厚度为 $8 \sim 9$ mm,070612061 型的熔渣层厚度为 $12 \sim 13$ mm,后者较前者好些,但两者不能很好满足要求,经过建立铸坯传热模型,得知铸坯出结晶器时宽面中心表面温度为 1049 °C,因此,为了保证所使用的保护渣在结晶器内保持“全程液态润滑”,必须使其熔化温度 ≤ 1049 °C,熔速控制在 (34 ± 2) s。

(3) 绝热特性。高速板坯连铸保护渣应具备良好的绝热特性,由现场可见,这 2 种现行保护渣都具备良好的绝热特性,渣面较活跃。

(4) Al_2O_3 等夹杂的吸收能力。高速板坯连铸保护渣应具备有良好的夹杂吸收能力并保持吸收后熔渣性能稳定。由上面 2 种保护渣的初始液渣、1 h 后的液渣、2 h 和 3 h 后的液渣性能研究可以看出,2 种现行保护渣都不具备良好的夹杂吸收能力,且吸收夹杂后熔渣性能极不稳定,需要对其进行优化设计。

(5) 析晶率和析晶温度。高速板坯连铸保护渣应具备低的析晶率和析晶温度,这样才能使熔渣有良好的玻璃态。通过 2 种保护渣的结晶相研究,可以看出,051230 型保护渣玻璃相占 $10\% \sim 12\%$,070612061 型保护渣玻璃相占 $78\% \sim 80\%$,后者比前者析晶率低,性能较好。

5 结论

(1) 通过实验测得的 2 种保护渣的熔化特性,可以看出 2 种保护渣不能很好满足要求,经过建立铸坯传热模型,得知铸坯出结晶器时宽面中心表面温度为 1049 °C,因此,为了保证所使用的保护渣在结晶器内保持“全程液态润滑”,必须使其熔化温度 ≤ 1049 °C,熔速控制在 (34 ± 2) s。

(2) 现场测得 051230 熔渣层厚度为 $8 \sim 9$ mm,070612061 熔渣层厚度为 $12 \sim 13$ mm。板坯连铸保护渣的熔渣层厚度应控制在 $10 \sim 15$ mm。

(3) 板坯拉速 ≥ 1.5 m/min,粘度应为 $0.01 \sim 0.15$ Pa·s;拉速 < 1.5 m/min时,粘度值应为 $0.1 \sim 1.0$ Pa·s。计算的 051230 渣粘度为 0.27 Pa·s,070612061 渣粘度为 0.19 Pa·s,后者能够适用高速连铸,前者粘度偏高。

(4) 通过实验测得的 2 种液渣的 Al_2O_3 含量,可以看出,两者都不具备良好的夹杂物吸收能力。

(5) 通过实验测得的 2 种液渣的熔化温度,可以看出,2 种保护渣吸收夹杂后熔渣性能都不稳定,两者的熔化温度随时间变化的趋势正好相反,并且 070612061 型液渣的熔化温度变化率比 051230 型液渣大,这可能是加入了 Li_2O 和 B_2O_3 的原因。

(6) 实验测得 051230 型保护渣结晶矿物主要有黄长石、硅灰石、枪晶石和玻璃相,且结晶粒度差别较大;而 070612061 型结晶矿物只有黄长石和玻璃相,且玻璃相占大部分,可见后者比前者析晶率低,性能较好。

教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0257)

参考文献

- 1 段大福. 高拉速连铸保护渣的研究现状. 炼钢, 2005(2): 53
- 2 胡汉涛, 魏季和, 茅洪祥. 高速连铸用结晶器保护渣. 炼钢, 2001(12): 50
- 3 Pinheiro J A. Mold Flux Developments for High Speed Slab Casting. 1996 Steelmaking Conference Proceedings: 259
- 4 饶添荣. 连铸保护渣的特性及其选用. 上海金属, 2004(3): 50
- 5 曹立军. 唐钢 FTSC 薄板坯连铸结晶器传热研究与保护渣性能优化. 唐山: 河北理工大学, 2006
- 6 Koyama K. Design for Chemical and Physical Properties of Continuous Casting Powders. Nippon Steel Technical Report, 1987, 34(8): 41
- 7 迟景灏, 甘永年. 连铸保护渣. 沈阳: 东北大学出版社, 1993
- 8 张贺林, 朱果灵. 薄板坯连铸用保护渣. 钢铁, 1995(2): 23
- 9 朱立光, 王硕明, 张彩军, 等. 现代连铸工艺与实践. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2000

朱立光(1965-), 男, 博士, 教授, 副校长, 1997 年北京科技大学毕业, 炼钢和连铸研究。

收稿日期: 2008-01-25