

· 工艺技术 ·

高强度包晶钢 S690 保护渣性能对超宽板铸坯裂纹的影响

曹树卫¹ 高新军² 贺瑞飞³

(1 安阳钢铁股份有限公司, 安阳 455004; 2 安阳钢铁股份有限公司第二炼轧厂, 安阳 455004;

3 安阳钢铁集团公司技术中心, 安阳 455004)

摘要 设计了超宽板坯高强包晶钢 S690 的 A、B 两种保护渣, 配方 A(/%) : 28 ~ 32SiO₂, 38 ~ 40CaO, 4.8 ~ 6.0TC, 2.3 ~ 4.3Al₂O₃, 6.7 ~ 9.7F; B(/%) : 25.2 ~ 26.4SiO₂, 41 ~ 43CaO, 4.8 ~ 6.0TC, 2.3 ~ 4.3Al₂O₃, 10.5 ~ 11.8F。保护渣在生产现场试验后, 对该保护渣的传热性能和渣膜进行了分析, 结果表明, A 保护渣性能最佳, 其碱度 1.25 ~ 1.35, 粘度(1 300 °C) 0.11 ~ 0.16 Pa·s, 凝固温度 1 170 ~ 1 200 °C; 与 B 保护渣(碱度 1.58 ~ 1.64, 1 300 °C 粘度 0.07 ~ 0.10 Pa·s, 凝固温度 1 220 ~ 1 250 °C) 相比, 铸坯裂纹率从 0.69% 降至 0.30%。

关键词 超宽板坯 高强包晶钢 保护渣 性能

Effect of Properties of Mould Powder for High Strength Peritectic Steel S690 on Crack of Jumbo-wide Cast Slab

Cao Shuwei¹, Gao Xinjun² and He Ruifei³

(1 Anyang Iron & Steel Co. Ltd., Anyang 455004; 2 The No 2 Steel Making & Rolling Plant, Anyang Iron & Steel Co. Ltd., Anyang 455004; 3 The Technology Center, Anyang Iron & Steel Co. Ltd., Anyang 455004)

Abstract Two kinds of A and B mould powder, A(/%) : 28 ~ 32SiO₂, 38 ~ 40CaO, 4.8 ~ 6.0TC, 2.3 ~ 4.3Al₂O₃, 6.7 ~ 9.7F; B(/%) : 25.2 ~ 26.4SiO₂, 41 ~ 43CaO, 4.8 ~ 6.0TC, 2.3 ~ 4.3Al₂O₃, 10.5 ~ 11.8F for high strength peritectic steel S690 jumbo-wide slab are designed. After mould powders are used in situ, their heat transfer properties and films are analyzed. The results show that the properties of powder A with basicity 1.25 ~ 1.35, viscosity at 1 300 °C 0.11 ~ 0.16 Pa·s, solidification temperature 1 170 ~ 1 200 °C are optimum. As compared with powder B (basicity 1.58 ~ 1.64, 1 300 °C viscosity 0.07 ~ 0.10 Pa·s, solidification temperature 1 220 ~ 1 250 °C), the cast slab crack rate decrease from 0.69% to 0.30%.

Material Index Jumbo-wide Slab, High Strength Peritectic Steel, Mould Powder, Property

安钢超宽板坯连铸机投产于 2005 年, 最大浇注宽度为 3 250 mm, 是目前世界上最宽的板坯连铸机之一, 连铸机主体设备及主要技术从德国 SMS-Demag 公司引进。宽板坯连铸及其凝固过程中主要有以下特点^[1-3]: 随铸坯宽度增加铸坯受到的拉应力增大, 同时结晶器上部散热面积增大, 散热量成平方增加。宽板坯中心点与侧边处的温差会比普通板坯高, 产生的收缩应力和热应力容易在中心集中。由于宽板坯连铸机具有结晶器内流场不均匀、坯壳横向温差大和所受应力大等特点, 使得较普通板坯更容易产生表面缺陷。

高强包晶钢由于存在包晶反应, 更易在表面产生纵裂纹缺陷, 从改善结晶器传热, 同时兼顾结晶器内润滑的角度出发, 选择合适的高碱度高润滑性能的保护渣, 能够更好的解决包晶钢在应用过程中的传热和润滑之间的矛盾, 达到提高表面质量和防止粘结漏钢的目的。

1 宽板坯包晶钢保护渣性能研究及配方确定

研究表明^[4], 当 [C] = 0.1% 时, 坯壳在 1 493 °C 以下不远处的高温区即在弯月面附近 100% 的 δ-Fe 转化为 100% γ-Fe, 所以相变收缩量大, 收缩量大约为 4%, 坯壳的线收缩最大, 形成的空隙也最大, 振痕也最深, 表面裂纹也最容易产生。而超宽板坯因宽厚比大, 凝固坯壳的传热均匀性较差, 铸坯表面纵裂纹控制较难。以上两方面因素互相影响、相互叠加, 使得超宽板坯生产包晶钢时铸坯表面裂纹的控制成为重点和难点。

文献指出^[5], 包晶钢这种裂纹敏感性钢, 保护渣设计的重点应放在控制从铸坯传往结晶器的热流上, 限制结晶器热通量, 希望保护渣具有较大热阻。结晶器钢液面上的液态保护渣流入坯壳与结晶器铜板之间的缝隙, 形成渣膜。渣膜的状态决定了其性能, 当渣膜中晶体的比率较高时, 会增加热阻, 减少坯壳向结晶器铜板的热通量, 实现弱冷工艺, 因此较

易实现传热的均匀性,这对铸坯表面纵裂纹的控制有利,但这样的渣膜对坯壳的润滑性能降低,易导致坯壳与结晶器铜板的粘结,对控制漏钢事故不利;反之亦然。因此,对于板坯连铸机来说,表面纵裂纹的控制和坯壳粘结的控制是一对矛盾,而宽板坯高强包晶钢保护渣的要求就是在矛盾中寻求平衡,在杜绝粘结的基础上降低铸坯纵裂纹的发生率。

宽板坯高强包晶钢主要考虑保护渣的粘度、碱度、凝固温度等,在综合考虑其对生产稳定性和铸坯表面质量的影响的基础上确定这些指标的合理范围。

1.1 粘度

保护渣粘度是表征在一定温度和一定剪切力作用下熔渣流入铸坯与结晶器间隙能力的大小,粘度值的大小合适是保证保护渣熔渣能够顺利填入结晶器与铸坯间通道,保证渣膜厚度,保证合理的传热速度和润滑铸坯的关键。粘度过高时,保护渣的消耗量降低,保护渣流入坯壳与铜板之间的缝隙困难,会造成保护渣渣膜的不连续,无渣膜处很容易导致坯壳与结晶器铜板之间的粘结;保护渣粘度过低时,保护渣消耗过快,会造成液渣层变薄,当液渣层厚度小于某一特定值(通常为结晶器振动行程加结晶器液面的波动范围),也会引起弯月面处坯壳的粘结,同时使得保护渣渣膜厚度不均匀,引起坯壳向结晶器的传热不均匀,容易产生板坯表面纵裂纹。

常用保护渣的粘度(1 300 ℃时)为 0.05 ~ 0.15 Pa · s^[6]。保护渣的粘度和拉速之间有匹配关系,即保护渣粘度和铸坯拉速的乘积应控制在 0.10 ~ 0.30。对于包晶钢,取保护渣粘度和铸坯拉速的乘积的中限为宜,即粘度和拉速的乘积应控制在 0.12 ~ 0.20。综合考虑炉机匹配、浇注断面、生产安全性等因素,将宽板坯生产包晶钢时连铸拉速设定在 1.05 ~ 1.25 m/min,因此确定宽板坯保护渣的粘度范围为(0.12 ± 0.04) Pa · s。

1.2 保护渣碱度

保护渣碱度指保护渣中碱性氧化物与酸性氧化物的比值,是保护渣的一项重要指标。通常碱度大,吸收夹杂物的能力也大,但它的析晶温度变大,不利

于传热和润滑性能^[7]。反之,如果保护渣碱度过小,则渣膜中玻璃体比率大,热阻变小,不利于表面纵裂纹的控制。

根据宽板坯保护渣的使用经验,对于裂纹敏感性较高的钢种,应该将保护渣的碱度控制在 1.2 以上,考虑到包晶钢表面纵裂纹控制的需要,决定将包晶钢碱度控制在 1.45 ± 0.20。

1.3 凝固温度

保护渣的凝固温度是指熔渣从液态向固态转变的温度。保护渣的凝固温度与结晶温度有相关性,文献指出^[8],保护渣结晶温度的提高可使纵向裂纹指数下降。凝固温度越高,形成的固态渣膜越厚,其导热阻力越大。研究表明,随着凝固温度的增加,对结晶器和铸坯间的润滑变坏,摩擦力增大,容易产生粘结。相反,凝固温度过低则热流变大,有可能形成纵裂纹。

保护渣凝固温度的确定不仅要考虑上述粘结与纵裂纹之间的平衡问题,对于裂纹敏感性钢种,拉速越高,凝固温度应越低,拉速越低,凝固温度应越高,还需要考虑钢水浇注温度、断面等方面的影响。确定宽板坯包晶钢保护渣的凝固温度为(1 200 ± 80)℃。

1.4 宽板坯保护渣配方确定

宽板坯包晶钢表面纵裂纹的产生与结晶器热流有关,而结晶器的热流除与结晶器冷却水有关外,还取决于保护渣的传热性能。考虑到保护渣的碱度、F 的含量和渣耗量等综合性因素后,根据宽板坯连铸机的操作经验以及实际工艺状况,设计了两个不同的保护渣配方(A、B),具体保护渣理化指标见表 1。

2 保护渣试验情况

2.1 试验钢种情况

保护渣试验钢种为 S690,其成分见表 2。其生产工艺流程为:铁水预处理-150 t 转炉-150 t LF-VD-板坯连铸机。

各工序相关工艺技术参数为:

铁水预处理:铁水终点硫含量 < 0.002%,扒渣亮面 ≥ 90%。

表 1 两种保护渣理化指标

Table 1 Physical-chemical index of two mould powders

保护渣	主要化学成分 / %					碱度	1 300 ℃粘度 / (Pa · s)	凝固温度 / ℃
	SiO ₂	CaO	TC	Al ₂ O ₃	F			
A	28 ~ 32	38 ~ 40	4.8 ~ 6.0	2.3 ~ 4.3	6.7 ~ 9.7	1.25 ~ 1.35	0.11 ~ 0.16	1 170 ~ 1 200
B	25.2 ~ 26.4	41 ~ 43	4.8 ~ 6.0	2.3 ~ 4.3	10.5 ~ 11.8	1.58 ~ 1.64	0.07 ~ 0.10	1 220 ~ 1 250

表2 S690 钢的化学成分 / %

Table 2 Chemical composition of steel S690 / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Cr
范围	0.12 ~ 0.14	0.17 ~ 0.30	1.35 ~ 1.45	≤ 0.015	≤ 0.005	0.02 ~ 0.03	0.010 ~ 0.025	0.30 ~ 0.40
目标值	0.13	0.25	1.40	0.010	0.003	0.025	0.020	0.35

表3 高强包晶钢 S690 保护渣现场试验数据

Table 3 Testing data in situ of mould powders for high strength peritectic steel S690

项目	A 保护渣	B 保护渣
试验炉数/炉	3	4
试验断面/mm	2 600	2 500/2 600
试验拉速/(m · min ⁻¹)	1.2	1.2
结晶器锥度/%	1.15	1.15
液渣层厚度/mm	11 ~ 13	15 ~ 16
结晶器宽面热流/(MW · m ⁻²)	1.25 ~ 1.35	1.33 ~ 1.44
保护渣消耗/(kg · t ⁻¹)	0.60	0.75
纵裂纹比率/%	0.30	0.69

150 t 转炉: 终点控制 [C] ≤ 0.10%, [P] ≤ 0.012%, [S] ≤ 0.015%; 温度 1 630 ~ 1 670 °C。

150 t LF: LF 精炼时间 ≥ 30 min, 黄白渣保持时间 ≥ 15 min。

VD: 真空度 ≤ 67 Pa; 真空保持时间 ≥ 8 min。

板坯连铸机: 钢水过热度为 10 ~ 25 °C, 拉速 1.1 ~ 1.2 m/min。

2.2 试验情况

两种保护渣现场试验过程中三层结构稳定, 渣条适中, 现场使用情况正常。通过对包晶钢保护渣生产情况的跟踪和数据统计, 包括吨钢消耗, 液渣层的厚度, 热流密度变化等见表 3。

3 分析和讨论

3.1 结晶器热流与纵裂纹之间的关系

在生产期间, 两种保护渣的传热性能差别较大, 主要表现在检测到的结晶器热流和漏钢预报热电偶测量的铜板温度上。A 保护渣的热流比较平稳, 宽面热流范围为 1.25 ~ 1.30 MW/m²; 而 B 保护渣的宽面热流为 1.33 ~ 1.45 MW/m², 且热流波动较大。该连铸机有漏钢预报功能, 在结晶器宽面铜板上布置有 2 排热电偶, 生产过程中可以检测结晶器铜板的温度, 试验 A 保护渣时结晶器热面温度较低, 热点区域较小, 第 1 排热电偶测量的温度为 121 ~ 146 °C, 第 2 排热电偶测

量的温度为 66 ~ 99 °C; 试验 B 保护渣时结晶器热面温度较高, 存在大片热点区域, 热点区域温度高, 第 1 排热电偶测量的温度为 120 ~ 166 °C, 第 2 排热电偶测量的温度为 70 ~ 120 °C。

从试验过程两种保护渣的传热性能表现与纵裂纹比率有明显的对应关系: 结晶器热流较大的 B 保护渣的裂纹比率比 A 保护渣的裂纹比率高, 这与文献[9-10]的结论一致。

3.2 结晶器渣膜分析

浇次结束, 从结晶器取保护渣渣膜分析。发现 A 保护渣和 B 保护渣的渣膜均为结晶相, 其组分均为枪晶石 (3CaO · 2SiO₂ · CaF₂), 这与文献[11]的观点一致。

能谱分析表明, 两种保护渣的渣膜结晶相基本没有差别, 但试验中传热性能表现有较大差异, 为进一步查找其原因, 进行了其他方面的分析。

渣膜厚度测量。对保护渣渣膜厚度进行了测量, 见图 1。从图 1 可以看出, A 保护渣的结晶器渣膜厚度为 2.2 ~ 2.3 mm, 相对比较均匀, 而 B 保护渣渣膜厚度为 2.1 ~ 2.9 mm, 厚度差别较大。

光学显微镜分析。对保护渣渣膜进行光学显微镜观察, 见图 2。图 2 中, 深色区域为渣膜内的气孔, 从图 2 中可见, A 保护渣的气孔较多, 且分布较为均匀, 而 B 保护渣也存在气孔, 且有较大的气孔, 但气孔分布不均匀。

电子显微镜分析。对保护渣渣膜进行电镜分析, 得出 A 保护渣渣膜晶粒尺寸大于 B 保护渣渣膜的晶粒尺寸。

通常认为^[12], 渣膜中析出的结晶相枪晶石 (3CaO · 2SiO₂ · CaF₂) 呈柱状结构, 使渣膜表面变得粗糙, 增加渣膜与铜板的界面热阻; 结晶层中存在 CaF₂ + Na₂O → CaO + 2NaF ↑ 这一反应, 气体逸出, 存在许多微小孔隙, 增加渣层热阻。

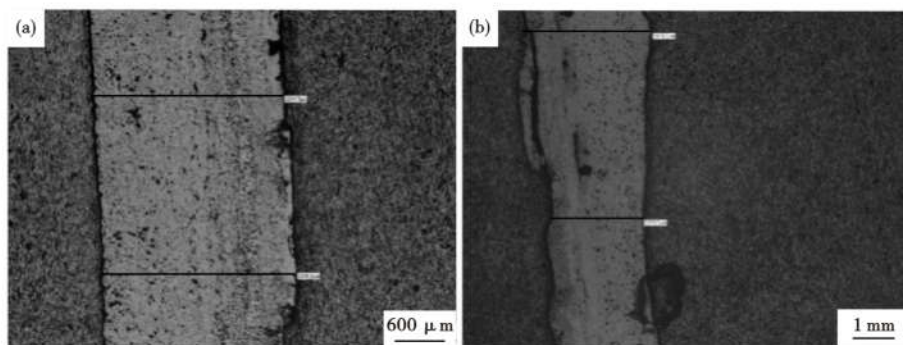


图1 保护渣 A(a)和 B(b)渣膜厚度测量

Fig. 1 Measurement of film thickness of powder A (a) and powder B (b)

比较上述两种保护渣,发现 A 保护渣比 B 保护渣的渣膜更均匀,因此 A 保护渣的传热比 B 保护渣更均匀;从渣膜内的气孔看,A 保护渣的气孔更多,因此由气孔引起的热阻更大,同时 A 保护渣的晶粒比 B 保护渣的晶粒大,其与铜板之间的界面热阻也更大,使用 A 保护渣更容易实现铸坯在结晶器内的弱冷。这也是使用 A 保护渣使得铸坯表面纵裂纹比率较低的深层次原因。

4 工业生产效果验证

根据现场情况,对保护渣 A 进行工业生产实践验证,进行了 10 t 保护渣的验证,其结果见表 4。从表 4 中可以看出,工业生产实践中表明,保护渣 A 较为稳定,能够满足现场生产需要。

5 结论

(1) 碱度、粘度和凝固温度是宽板坯包晶钢保护渣的重要性能指标,通过对这些性能指标的优化设计,可得到合适的宽板坯包晶钢保护渣。

(2) 即使保护渣渣膜均为结晶相,但渣膜厚度均匀性、渣膜内的气孔分布以及晶粒尺寸大小对传热的均匀性和传热热阻有影响。

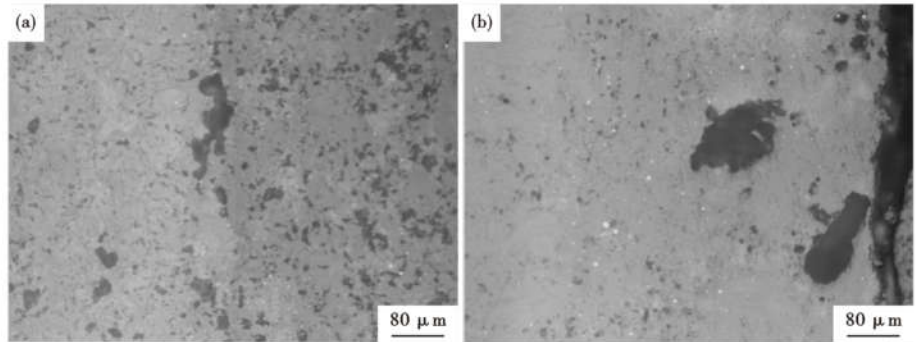


图 2 保护渣 A(a)和 B(b)渣膜的形貌,光学显微镜
Fig. 2 Morphology of slag film of powder A (a) and powder B (b), optical microscope

表 4 高强包晶钢 S690 保护渣 A 工业生产实践验证数据
Table 4 Validation data of industrial testing for high strength peritectic steel S690 using powder A

项目	数据
试验炉数/炉	116
试验断面/mm	2 500, 2 600
试验拉速/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	1.1 ~ 1.2
结晶器锥度/%	1.15
液渣层厚度/mm	11 ~ 15
结晶器宽面热流/($\text{MW} \cdot \text{m}^{-2}$)	1.22 ~ 1.37
保护渣消耗/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	0.56 ~ 0.60
纵裂纹比率/%	0.38

参考文献

- [1] 周有预,袁凡成.宽板坯高拉速连铸的特点及铸坯缺陷的预防[J].钢铁研究,2003(6):1-5.
- [2] 穆康锋,付谦惠,程晓文.连铸宽板坯表面纵裂纹成因及控制措施[J].炼钢,2010,26(4):24-25.
- [3] 高新军,王三忠,王飞日,等.宽板坯连铸机浇次第 1 炉纵裂产生原因及控制措施[J].连铸,2011(3):44-46.
- [4] 卢盛意.包晶钢的碳含量及相关的凝固收缩[J].连铸,2008(5):31-32.
- [5] 李殿明,邵明天,杨宪礼,等.连铸结晶器保护渣应用技术[M].北京:冶金工业出版社,2008:85.
- [6] 朱立光,王杏娟.连铸保护渣理论与实践[M].北京:冶金工业出版社,2015:28-29.
- [7] 李殿明,邵明天.连铸结晶器保护渣应用技术[M].北京:冶金工业出版社,2008:15.
- [8] Emi M. The Mechanisms for Sticking Type Breakouts and New Developments in Continuous Casting Mold Fluxes [C]. INS 74 Steel Making Conference Proceedings,1991:623.
- [9] 卢盛意.连铸保护渣的润滑作用和水平传热[J].连铸,2007(2):36-39.
- [10] 朱祖民,张晨.板坯连铸缓冷型保护渣[J].钢铁,2007,42(8):29-31.
- [11] 卢盛意.连铸板坯包晶钢的纵裂问题[J].连铸,2003(6):34.
- [12] 蔡开科.连铸坯质量控制[M].北京:冶金工业出版社,2010:203-205.

曹树卫(1976-),男,工学博士,博士后(2011年北京科技大学),教授级高工,1999年武汉科技大学(本科)毕业,钢铁材料工艺研究及新产品研发。

E-mail: caoshuwei2007@163.com

收稿日期:2020-07-17