



15CrMoG 矩形坯保护渣优化实践

张军卫, 郝文权, 颜昊, 刘政鹏
(青岛特殊钢铁有限公司工艺研究所, 青岛 266409)

摘要:针对 15CrMoG 矩形坯出现的凹陷与纵向裂纹, 设计了保护渣熔化温度、碱度、粘度等技术参数。将保护渣碱度由 0.85 调整到 1.15, 熔点由 1 132 °C 调整到 1 200 °C, 粘度由 0.67 Pa·s 调整到 1.4 Pa·s, 提高保护渣的析晶率, 增大固态渣膜厚度, 提高热阻, 均匀稳定了传热; 同时将保护渣熔速由 70 s 优化到 32 s, 控制振动参数, 提高非正弦振动偏斜率, 增大保护渣消耗量, 改善润滑。通过保护渣理化指标和振动参数的优化, 消除了铸坯表面凹陷与纵向裂纹。不良铸坯的精整处理比例大幅降低, 减少了铸坯修磨工作量, 提高了金属收得率。

关键词: 15CrMoG 钢; 凹陷; 纵裂; 保护渣

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2022-00214 **中图分类号:** TF703

Optimization Practice of 15CrMoG Rectangular Billet Protection Slag

Zhang Junwei, Hao Wenquan, Yan Hao, Liu Zhengpeng
(Technology Research Institute of Qingdao Special Iron & Steel Co., LTD., Qingdao 266409, China)

Abstract: Aiming at the sags and longitudinal cracks of 15CrMoG rectangular billet, the melting temperature, alkalinity, viscosity and other technical parameters of protective slag were designed. By adjusting the alkalinity of the protective slag from 0.85 to 1.15, the melting point from 1 132 °C to 1 200 °C, and the viscosity from 0.67 Pa·s to 1.4 Pa·s, the crystallization rate of the protective slag was increased, the thickness of solid-state slag film was increased, the thermal resistance was improved, and the heat transfer was uniformly stabilized. At the same time, the melting rate of the slag was optimized from 70 s to 32 s, vibration parameters were controlled, non-sinusoidal vibration bias slope was increased, slag consumption was increased, and lubrication was improved. The surface sags and longitudinal cracks of the billet were eliminated by optimizing the physicochemical parameters and vibration parameters of the slag. The proportion of defective casting billet finishing treatment was greatly reduced, which reduced the grinding work of casting billet and improved the metal recovery rate.

Key Words: 15CrMoG Steel; Sags; Longitudinal Cracks; Protective Slag

青岛特殊钢铁有限公司 1# 连铸机生产 15CrMoG 钢 240 mm×300 mm 矩形坯。15CrMoG 钢多用于制造高、中压锅炉的主蒸汽管、过热器管、再热器管、导气管等。由于 15CrMoG 钢的含碳量为 0.13%~0.17%, 在一次冷却过程中会发生包晶反应, 其体积收缩较大, 初生坯壳与结晶器铜壁之间易产生气隙, 从而造成冷却传热不均匀, 润滑效果较差, 连铸坯表面容易出现凹陷和纵裂。表面凹陷、纵裂的出现, 轻者需修磨精整处理, 金属收得率降低, 严重时会导致漏钢事故发生, 影响正常生产^[1]。针对 15CrMoG 钢连铸坯表面存在的凹陷与纵裂质量问题, 青岛特钢通过优化保护渣理化指标和振动参数, 取得了良好的效果, 15CrMoG 钢铸坯表面质量明显改善。

1 保护渣的作用原理

1.1 结晶器保护渣的渣层结构及传热润滑

保护渣以粉渣层、烧结层、液渣层三种渣层结构存在于结晶器钢水液面。加入钢液面的保护渣, 经过预热、烧结, 形成液态渣层, 最后流入初生坯壳与结晶器铜壁之间, 形成液渣膜, 起到传热润滑的作用。结晶器铜壁和坯壳之间的渣膜是由固态渣膜和液态渣膜两部分组成。液态渣膜起润滑作用, 固态渣膜起均匀增大热阻的作用。结晶器内保护渣的渣层结构与形态如图 1 所示。

1.2 保护渣的作用

浇钢过程中, 结晶器保护渣的作用主要有以下 5 个方面: (1) 绝热保温钢液; (2) 防止钢液被二次氧化; (3) 吸附钢液上浮的夹杂物; (4) 在结晶器铜壁

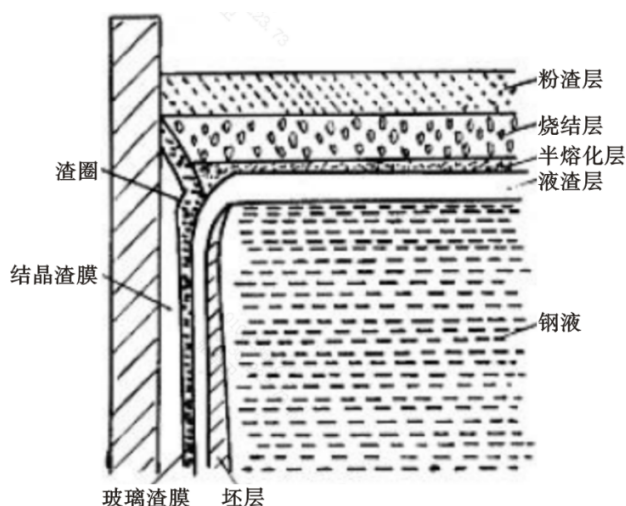


图1 结晶器内保护渣渣层结构与形态示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure and morphology of the protective slag layer in the mold

与坯壳之间形成液态渣膜,起润滑作用;(5)控制坯壳传热到结晶器铜壁。

2 15CrMoG 钢矩形坯质量分析

2.1 15CrMoG 钢的生产工艺与表面质量问题

青岛特钢按 GB/T 5310-2008 标准生产 15CrMoG 钢的工艺流程为:高炉铁水+废钢-铁水 KR 脱硫-100 t 顶底复吹转炉(钢包钢水容量 110 t)-100 t LF 精炼炉-100 t RH 精炼炉-240 mm×300 mm 矩形坯连铸机。15CrMoG 钢化学成分见表 1。

15CrMoG 钢 240 mm×300 mm 矩形坯表面存在

的质量问题主要为凹陷和纵向裂纹,如图 2 所示。

2.2 表面质量问题形成原因分析

由表 1 可知,15CrMoG 钢的含碳量在包晶反应的碳含量范围内,属于包晶范围钢。包晶钢在浇注过程中,弯月面初生坯壳冷却速度快,体积收缩大,坯壳与铜壁之间产生不均匀的气隙,从而影响传热,会造成一冷区域内坯壳冷却不均。坯壳在热应力、凝固收缩力、钢水静压力和摩擦力的作用下,在薄弱处易形成凹陷。凹陷部位,冷却收缩慢,组织粗化,易形成纵向裂纹^[2]。分析认为,凹陷与纵向裂纹的形成与热应力和组织应力相关。

对一冷、二冷的水冷制度及结晶器铜管的倒锥度进行排查分析,没有发现异常。因此,需排查分析保护渣的适用性。保护渣的物理化学指标见表 2。

保护渣具有较好的铺展性,液渣层的厚度较小(测量为 5~7 mm),保护渣消耗较少(测算为 0.23 kg/t)。分析认为:表面凹陷与纵向裂纹的产生与保护渣的设计存在一定的关系,所使用保护渣液渣层厚度较薄、渣量消耗少,需进一步优化保护渣的理化指标。

3 15CrMoG 钢矩形坯保护渣的优化设计

15CrMoG 钢属于包晶钢,有较强的裂纹敏感性,其在固相线温度附近发生 L+ δ → γ 包晶反应和 δ → γ 包晶转变,其中包晶转变产生较大的收缩,会造

表 1 15CrMoG 钢化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 15CrMoG steel

项目	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
标准	0.12~0.18	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	0.40~0.55	≤0.025	≤0.015
目标值	0.14~0.16	0.23~0.28	0.53~0.58	0.90~0.95	0.42~0.44	≤0.015	≤0.005
试验坯	0.16	0.25	0.54	0.91	0.42	0.012	0.005

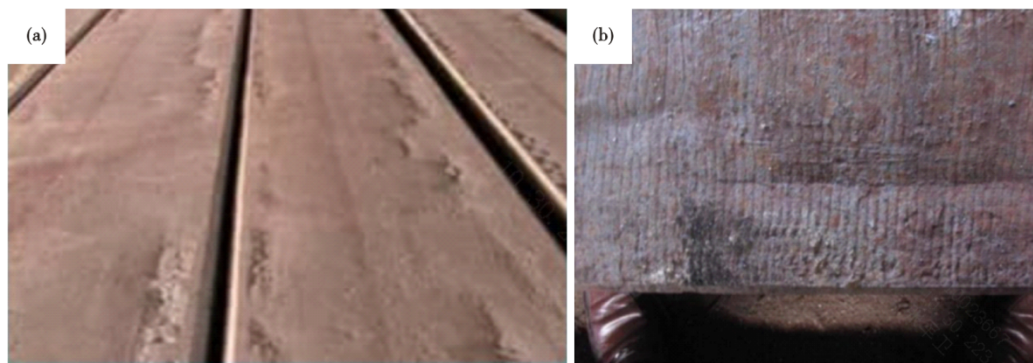


图2 15CrMoG 钢 240 mm×300 mm 矩形坯的表面质量:(a)凹陷,(b)纵向裂纹

Fig. 2 Surface quality of 15CrMoG steel 240 mm×300 mm rectangular billet:(a) sag,(b) longitudinal crack

表 2 保护渣的理化指标检测值
Table 2 Physical and chemical indexes of the protective slag used

渣成分/%				碱度(R)	1 300 °C熔速/s	1 300 °C粘度/(Pa·s)	密度/(g·cm ⁻³)	熔点/°C
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	C					
31.5	10.0	26.0	13.5	0.85	70	0.67	0.75	1 132

成初生坯壳生长不均匀、晶粒粗大。初生坯壳受复杂应力影响,极易产生裂纹^[3]。因此,包晶钢保护渣的设计应以控制铸坯到结晶器铜壁上的热流为重点,即希望保护渣熔化形成的渣膜能产生较大的热阻。有学者提出,包晶钢应选用碱度、凝固温度、结晶温度都较高的保护渣^[4],这样,可以得到更多结晶相的固态渣膜,利用这个渣膜可以减缓保护渣的传热速度,有利于降低铸坯冷却的热应力,减少裂纹的产生。

针对包晶钢 15CrMoG 钢一冷裂纹敏感的特点,同保护渣生产厂一起,基于现行设备与工艺条件,对所使用保护渣的熔化温度、熔化速度、粘度、碱度的参数进行优化,同时还优化了结晶器的振动参数。

3.1 熔化温度的优化

熔化温度与连铸保护渣的绝热保温性能和润滑性能密切相关,直接影响结晶器内弯月面以上渣层的结构与传热。保护渣熔化温度越高,形成的固态渣膜越厚,其导热阻力越大^[5]。包晶钢保护渣的设计应实现保护渣具有较大热阻,故应当适当提高保护渣熔化温度,提高保护渣的结晶温度,以提高固态渣膜的厚度。

为了保证一定厚度的液态渣膜始终存在于结晶器长度方向,保护渣熔点的设计应略低于或等于结晶器下口处的坯壳表面温度。结晶器下口铸坯的表面温度约为 1 250 °C,保护渣的熔化温度应不高于这个温度^[6]。因此,判断原保护渣的熔点偏低,故将保护渣的熔化温度调整到 1 200 °C 左右。

3.2 熔化速度的优化

熔化速度会影响液渣层在钢液面上的厚度,从而影响保护渣流入到结晶体与坯壳之间的量。连铸坯的保护渣要熔化速度适宜,方可保证液渣层厚度,满足渣量消耗的需要。原保护渣熔化速度为 70 s,熔化速度相对缓慢。从现场实际测量的液渣层厚度(5~7 mm)与渣耗量(0.23 kg/t)看,结晶器内钢液上方的液渣层较薄,液渣不能满足填充坯壳与铜壁之间间隙的需要,会造成结晶器内冷却不均。液渣层过薄还会因液面的波动而卷渣。为了避免上述问

题的出现,将保护渣的熔化速度优化到 32 s。

3.3 粘度的优化

保护渣粘度是决定渣消耗量和均匀渗入的重要性能之一,是控制结晶器与铸坯之间传热和润滑的重要参数。粘度过高,熔化的保护渣不易渗透到结晶器铜壁与钢坯之间的空隙中,钢坯润滑条件变差,造成钢坯壳不易被拉出结晶器,严重时会引起粘结漏钢事故;粘度过低,熔化保护渣大量流入结晶器铜壁与坯料之间,造成润滑、传热不均,从而形成铸坯表面裂纹,甚至是漏钢事故。因此,熔渣是否能够顺利渗入结晶器铜壁与坯壳之间的空隙,并形成合适的渣膜,达到需要的传热和润滑目的,粘度显得尤为关键。粘度的设计要遵循粘度与拉速匹配的原则,同时也要保持稳定。润滑状况的评定依据:利用 η (粘度)与 V (拉速)的乘积值进行评定,其数值过小、过大均表示渣膜厚度和保护渣耗量不合理,表示润滑状况不佳。低粘度和低拉速,或高粘度和高拉速的搭配都不可取。 $\eta \cdot V_c = 1 \sim 3.5$ (Pa·s)·(m/min)时,摩擦力和热流最小^[7]。此时,坯料润滑良好,传热均匀,能够获得良好的铸坯质量并保证生产顺利进行。

青岛特钢 15CrMoG 钢的拉速为 0.85 m/min。为降低铸坯与结晶器铜壁间的摩擦力,提高润滑效果,经过测算,将保护渣粘度指标调整为 1.4 Pa·s。

3.4 保护渣碱度的优化

包晶钢 15CrMoG 钢连铸过程中,铸坯坯壳收缩较大,初生坯壳生长不均,易出现裂纹。因此,在实际生产中,应尽可能缓冷。缓冷的实现,有两种方式,一是减弱结晶器的水冷强度,二是使用结晶倾向较强的保护渣来增加热阻,限制结晶器与坯壳间的过快传热。学者研究表明:保护渣随碱度的升高,玻璃态渣膜表面会逐渐粗糙化并伴随晶体量增多,结晶率提高,渣膜热阻增大^[8]。提高结晶器保护渣的碱度,会使保护渣的熔化温度和结晶温度提高,使保护渣非玻璃化程度提高^[9],可以达到增加结晶器内一次冷却热阻的目的。

国内研究者对包晶钢保护渣的传热性能进行分析,认为保护渣碱度在 0.9~1.3 有利于促进渣膜

表3 优化调整前后保护渣理化指标对比

Table 3 Comparison of physical and chemical indexes of protective slag before and after optimization adjustment

项目	拉速 $/(m \cdot min^{-1})$	渣成分/%				碱度 (R)	1 300 °C 熔速/s	1 300 °C 粘度/ $(Pa \cdot s)$	容重 $/(g \cdot cm^{-3})$	熔点/ $^{\circ}C$
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	C					
优化前	0.85	31.5	10.0	26.0	13.5	0.85	70	0.67	0.75	1 132
优化后	0.85	27.1	10.1	31.1	11.5	1.15	32	1.4	0.77	1 200

结晶体析出控制传热^[10]。为此,将保护渣的碱度R由0.85提高至1.15。碱度提高后,保护渣的结晶温度和凝固温度均有所提高,保护渣的热阻增大,一次冷却均匀性提高,表面凹陷与裂纹得到有效控制;但碱度提高后,粘度增加,固态渣膜增厚,渣耗量减少,润滑性变差。

3.5 结晶器振动参数的优化

新设计优化的保护渣,熔化速度提高到了32 s,液渣层厚度提升较大,达到10~12 mm。受新设计保护渣碱度、熔化温度、粘度都较高的影响,保护渣消耗量增长较少,消耗量仅为0.28 kg/t。

结晶器振动参数的调整也会影响保护渣的消耗量,影响铸坯的表面质量。为更好的提高铸坯表面质量,在保护渣优化的同时,对结晶器振动参数也进行优化。保护渣的消耗量与振频是减函数关系,与振幅是增函数关系,与非正弦振动的偏斜率是增函数关系。为进一步提高渣耗量,调整非正弦振动的振动参数,将生产拉速下的振频减少到70次/s,振幅提高到3.5 mm,并将偏斜率由原来的0.20提高到0.28。调整后,结晶器振动的负滑脱时间增加,保护渣消耗量也增加到0.32 kg/t,铸坯表面质量得到进一步提高。

参考文献

- [1] 修立策. 连铸坯表面纵裂纹原因分析及控制措施[J]. 炼钢, 2007, 23(3): 27-31.
- [2] 朱立光, 张彩军, 韩毅华, 等. 包晶钢连铸用保护渣性能优化[J]. 河南冶金, 2012, 20(5): 1-4.
- [3] 李亚强, 刘建华, 何杨, 等. 15CrMoG钢棒材表面缺陷机理分析和工艺改进[J]. 特殊钢, 2019, 40(6): 1-6.
- [4] 王新, 王兴娟, 朱立光, 等. Q195钢小方坯连铸保护渣的优化. 2013年低成本炼钢技术交流论坛论文集: 2013年(4), 153-158.
- [5] 曹树卫, 高新军, 贺瑞飞, 等. 高强度包晶钢S690保护渣性能对超宽板铸坯裂纹的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(1): 25-28.
- [6] 曹磊, 王国连, 黄伟青, 等. 选分结晶对包晶钢连铸坯表面裂纹的影响[J]. 炼钢, 2021, 37(3): 58-61.
- [7] 莫嵘臻, 张立峰, 任英, 等. 高铝钢用低反应型保护渣成分对其粘度的影响[J]. 钢铁研究学报, 2021, (8): 695-705.
- [8] 王杏娟, 樊亚鹏, 朱立光, 等. 碱度对连铸保护渣结晶率的影响[J]. 特殊钢, 2017, 38(2): 6-10.
- [9] 金柱元, 朱学瑾, 李亮, 等. 15CrMoG小方坯连铸保护渣优化工艺实践[J]. 山西冶金, 2021(4): 186-188.
- [10] 彭秀丽, 闫晓鹏, 刘磊, 等. 连铸结晶器保护渣渣膜传热特性研究进展[J]. 特殊钢, 2021, 42(6): 6-12.

4 保护渣优化后的效果对比

4.1 保护渣优化前后指标的对比

根据青岛特钢15CrMoG钢的低拉速与其凝固特性,对保护渣理化指标进行优化调整,优化调整前后的理化指标对比情况见表3。

4.2 保护渣优化后的效果

将优化的保护渣应用到15CrMoG钢240 mm×300 mm矩形坯的生产,铸坯表面凹陷与裂纹得到有效控制,表面质量得到明显提升。铸坯表面质量提升后,铸坯修磨精整的比例由原来的16%~25%迅速下降,极大地减少了铸坯修磨的工作量,避免了铸坯剥皮,金属的收得率得到了较大提高。

5 结论

将保护渣的碱度由0.85提高到1.15,熔点由1 132 °C提高到1 200 °C,粘度由0.67 Pa·s提高到1.4 Pa·s,提高保护渣的析晶率,增大固态渣膜厚度,提高热阻,实现均匀弱冷;将保护渣的熔速由70 s减少到32 s,同时提高结晶器振动的负滑脱时间,可以提升保护渣的消耗量,满足铸坯润滑的要求。通过以上保护渣的优化,消除了15CrMoG钢矩形坯出现的凹陷与纵向裂纹问题,减少了铸坯修磨,提高了金属收得率。