



优化结晶器保护渣以改善 38CrMoAl 高铝钢 连铸坯的表面质量

方 勇

(江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江阴 214400)

摘 要:研究了连铸生产 $w[\text{Al}]$ 为 0.7% ~ 1.1% 的 38CrMoAl 钢过程中, 使用不同性能的结晶器保护渣对连铸坯 (390 mm×510 mm) 表面质量的影响。结果表明, 38CrMoAl 钢表面质量与结晶器保护渣的物理化学性质有密切的关系。具体而言, 碱度为 0.38, 熔点为 1 008 °C, 粘度为 0.45 Pa·s 的低碱度、低熔点、低粘度性能的保护渣能够显著提升 38CrMoAl 钢在浇注过程中的稳定性, 改善铸坯的表面质量。连铸坯表面凹坑数量最大从 6.45 个/支降低到 0.3 个/支, 最大连续浇注炉数从 5 炉提升到 12 炉。与此同时, 这种结晶器保护渣在浇注过程的消耗量最大, 为 0.45 kg/t; 浇注结束后成分变化最小, 渣条中的 $w[\text{Al}_2\text{O}_3]$ 为 17.8%, $w[\text{SiO}_2]$ 为 29.0%。

关键词:高铝钢; 连铸; 结晶器保护渣; 表面质量

DOI:10.20057/j.1003-8620.2025-00006 **中图分类号:**TG162.83

Optimizing Mold Powder to Improve the Surface Quality of 38CrMoAl High Aluminum Steel Continuous Casting Billet

Fang Yong

(Jiangyin Xingcheng Special Steel Co.Ltd., Jiangyin 214400, China)

Abstract: The effects of different properties of mold slag on the surface quality of continuous casting ingots (390 mm × 510 mm) during the continuous casting of 38CrMoAl steel with an Al content of 0.7% to 1.1% were experimentally studied. The results show that the surface quality of 38CrMoAl steel is closely related to the physical and chemical properties of the mold slag. Specifically, mold slag with low basicity, low melting point, and low viscosity having a basicity of 0.38, a melting point of 1 008 °C, and a viscosity of 0.45 Pa·s can significantly improve the stability of 38CrMoAl steel during the casting process and enhance the surface quality of the ingot. The maximum number of pits on the surface of the continuous casting ingot was reduced from 6.45 per piece to 0.3 per piece, and the maximum number of continuous casting furnaces was increased from 5 to 12. At the same time, the consumption of this mold slag during the casting process was the highest, at 0.45 kg/t; the composition change was the smallest after casting, with the Al_2O_3 content in the slag at 17.8% and the SiO_2 content at 29.0%.

Key Words: High Aluminum Steel; Continuous Casting; Mold Protection Powder; Surface Quality

目前, 38CrMoAl 钢主要采用“转炉或电弧炉→LF 炉精炼→RH 或 VD 真空处理→连铸”的工艺流程进行生产, 生产过程中钢水可浇性和连铸保护渣这两个因素受到很多的关注和研究。例如, 通过取消 RH 钙处理工艺, 将精炼结束后钢水的 $w[\text{S}]$ 降低至 0.001% ~ 0.002%, 降低钢水中的 CaS 含量, 从而防止出现水口结瘤^[1]。同时, 38CrMoAl 钢属于高铝钢, 浇注过程中容易发生保护渣变性的问题。高碱度保护渣润滑效果差, 不利于生产, 通过添加适量的 Li_2O 可以很好地解决这个问题。有研究表明, 使用含 $w[\text{Li}_2\text{O}]$ 5.49% 的保护渣生产 38CrMoAl 高铝

钢, 可在 0.6 ~ 0.7 m/min 拉速下实现 120 min 的连续浇注, 且连铸坯表面的纵裂纹发生率可降低至 0.3% 以下^[2]。另一方面, 生产高铝钢时, 由于结晶器内保护渣中的 SiO_2 与钢水中的 $[\text{Al}]$ 会发生反应, 使结晶器保护渣变性, 产生高熔点的渣条。从而导致结晶器保护渣的性能急剧恶化, 传热性能变差, 润滑性能变差, 最终在连铸坯的表面形成凹坑及裂纹, 严重影响铸坯的表面质量。严重时甚至会发生由于坯壳凝固不均匀而导致漏钢等恶性生产事故, 严重地制约连铸生产高铝钢的顺行^[3-6]。结晶器内的渣圈由烧结相和结晶相组成, 随着结晶器振动, 附着

的烧结产物不断增加,导致渣圈不断长大^[7-10]。研究表明,高铝中碳钢连铸时,钢水中的[Al]浓度和保护渣中Al₂O₃浓度呈现正相关,即,保护渣中的Al₂O₃浓度随着钢水中[Al]浓度的上升而逐渐增加,最大可达到35%^[11]。

江阴兴澄特种钢铁有限公司生产38CrMoAl高铝钢,钢水纯净度能够得到有效的控制,不会出现Al₂O₃或CaS结瘤的情况。但在连铸拉浇(断面为390 mm × 510 mm)过程中存在保护渣的渣条过分生长,铸坯表面差的问题。通过改进结晶器保护渣的设计,改善结晶器保护渣的融化特性,使其在生产过程中的变性问题得到有效地控制,从而达到改善铸坯表面质量的目的,最终实现高铝钢连浇炉数达到12炉及以上。

2 试验材料及方法

1.1 保护渣与钢水之间的反应

在开发高铝钢专用结晶器保护渣前,大方坯采用常规的CaO-SiO₂渣系保护渣,在实际生产过程中钢-渣界面会发生化学反应,如式(1)。



这些反应使得渣中的SiO₂大量减少,Al₂O₃迅速增加,从而导致保护渣的熔点急剧升高,结晶器内壁产生渣条。尤其是铸坯角部的渣条的厚度可达到30 mm,长度达50 mm以上,生产结束后的渣条如图1所示。分析该渣条的化学组成发现,w[Al₂O₃]高于35%。这种成分的保护渣会严重阻碍保护渣的进一步流入,从而出现渣膜不均、润滑不佳、导热不均的问题,最终导致铸坯在结晶器内冷却效果差,铸坯表面出现严重的纵裂纹和凹坑,严重时甚至导致漏钢。

研究钢种为38CrMoAl,涉及的大方坯连铸机的参数见表1。

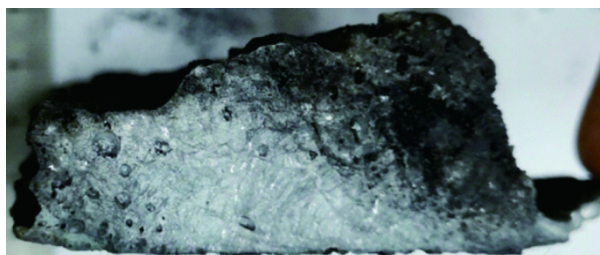


图1 传统的连铸结晶器保护渣在浇注结束后所形成的渣条形貌

Fig. 1 The slag strip morphology formed after the pouring of the traditional continuous casting mold protection slag

表1 生产38CrMoAl钢连铸机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of continuous caster produced 38CrMoAl steel

项目	参数
铸机类型	3机3流全弧形
结晶器振动形式	正弦
电磁搅拌	M-EMS+F-EMS
铸机弧半径/m	16.5
断面尺寸/(mm×mm)	390×510
二冷方式	动态配水,气雾冷却
拉矫系统	拉矫机8架,多点矫直

1.2 保护渣的成分和性能

设计了3种成分不同的结晶器保护渣,结合现场试验进行结果评价。3种结晶器保护渣的成分见表2。

表2 结晶器保护渣的成分和性质

Table 2 Ingredients and properties of mold covering slag

渣型	碱度(R)	w[CaO]/%	w[SiO ₂]/%	其余成分/%	熔点/°C	粘度 1300 °C/(Pa·s)
A	1.11	30	27	43	1 100	0.49
B	0.68	25	37	38	1 040	0.48
C	0.38	17	45	38	1 008	0.45

1.3 研究方法

选择38CrMoAl钢进行生产试验,拉速为0.45 m/min,过热度为10 ~ 15 °C。试验钢种38CrMoAl的主要化学成分见表3。

表3 试验钢38CrMoAl化学成分(质量分数)

Table 3 Chemical composition of experimental steel 38CrMoAl %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
0.35 ~ 0.42	0.20 ~ 0.45	0.30 ~ 0.60	≤ 0.030	≤ 0.030	1.35 ~ 1.65	0.70 ~ 1.10

试验过程采用控制变量法进行对比,将A、B、C这3种类型的结晶器保护渣在同一炉钢的连铸机的不同流次上分别进行使用,通过跟踪3种渣型的保护渣的消耗量、结晶器冷却水的温差、使用后保护渣的化学组成及连铸坯的表面质量来进行评价。

2 试验结果与讨论

2.1 生产结束后结晶器内的渣条情况

连续浇注5炉(275 min),生产结束后对结晶器内壁上渣条进行取样,并测量渣条厚度。结果表明,A、B、C这3种类型的结晶器保护渣所形成的渣

条有较明显的差异,其厚度分别为 20 ~ 30 mm、10 ~ 20 mm、5 ~ 10 mm,这说明 C 型渣的效果最好。渣条的实际形貌如图 2 所示。

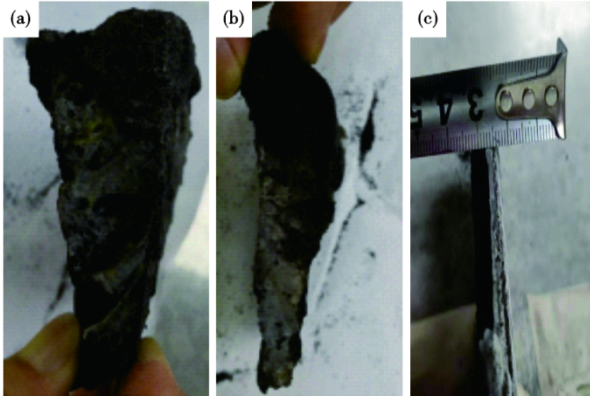


图 2 不同类型的结晶器保护渣所形成的渣条的形貌:(a) A 型渣,(b) B 型渣,(c) C 型渣

Fig. 2 The morphology of slag strips formed by different types of mold protection slag: (a) type A slag, (b) type B slag, (c) type C slag

结晶器保护渣的碱度对玻璃渣膜结晶有影响,具体的,碱度越高,保护渣核活化能越低,玻璃渣膜更容易形成^[12]。在浇注温度下随着拉浇的不断进行,玻璃渣膜不断长大并形成渣条,渣条的产生又反过来增加了渣膜的热阻,导致结晶器热传导率降低。经研究发现,低熔点、低粘度有利于改善保护渣的融化性质及流动性^[12]。本实验中 C 渣型的碱度、熔点、粘度均最低,最终的渣条厚度也最小(厚度:5 ~ 10 mm),这与预期得到很好地吻合。

2.2 保护渣的消耗量

生产时对 A、B、C 这 3 种类型的结晶器保护渣在浇注过程的消耗量进行统计,发现有明显的差异。具体而言,A 型渣与 B 型渣的消耗量比较接近,分别是 0.26、0.30 kg/t,而 C 型渣的消耗量明显偏高,为 0.45 kg/t。结合本次生产进行分析,随着结晶器内固态渣条的厚度不断增加,会逐渐加剧保护渣液渣层的排出,导致坯壳与结晶器铜管内壁之间的通道被堵塞,降低保护渣的烧结层向液渣层的转变速率,最终使得保护渣的消耗量产生差异。

2.3 结晶器的水温差

测量浇注过程中使用 A、B、C 这 3 种类型的结晶器保护渣的结晶器 4 个面(面 1~面 4)冷却水的温差,发现有一定差异。采用 A、B、C 型渣时的平均水温差最低分别为 5.1、5.4、6.3 °C,见表 4。

表 4 采用不同类型的保护渣生产时结晶器冷却水的平均温差

渣型	面 1 温度	面 2 温度	面 3 温度	面 4 温度	平均值
A	5.1	5.3	4.9	5.2	5.1
B	5.4	5.5	5.3	5.4	5.4
C	6.4	6.7	5.8	6.1	6.3

生产过程中持续监测使用上述 3 种类型保护渣的结晶器冷却水的温差,每间隔 5 s 进行一次测量。发现使用 A 型渣与 B 型渣的结晶器水温差 ΔT_A 和 ΔT_B 的波动较大,偏差为 4.5、4.0 °C,使用 C 型渣的结晶器水温差 ΔT_C 的波动相对小,偏差为 1.5 °C。

结晶器冷却水的温差是连铸坯壳与冷却铜管换热的体现。在结晶器内坯壳与铜管之间存在间隙,间隙是影响热阻的最显著的环节,热阻越大,结晶器冷却水的温差越低;热阻波动越大,结晶器冷却水的温差的波动越大。分析认为填充在坯壳与铜管之间的液态渣膜是影响热阻的最关键因素,使用 C 型渣的结晶器冷却水的平均温差最高,说明热阻最小,液态渣膜厚度合适且填充很充分。同时,冷却水的平均温差的偏差仅为 1.5 °C,说明渣膜厚度稳定。使用 A 型渣与 B 型渣的结晶器冷却水的平均温差较低,同时,偏差为 4.5、4.0 °C,说明液渣填充不充分且存在较大的波动。

2.4 浇注后渣条的化学组成

采用荧光分析分别对浇注结束后 3 种保护渣型的成分进行测量,结果见表 5。发现均有一定程度的变化。其中 A 型渣的变化最明显,渣条中的 $w[\text{Al}_2\text{O}_3]$ 达到了 42.1%, $w[\text{SiO}_2]$ 仅为 7.7%,C 型渣的变化情况最小,渣条中的 $w[\text{Al}_2\text{O}_3]$ 为 17.8%, $w[\text{SiO}_2]$ 为 29.0%。

表 5 浇注结束后 3 种结晶器保护渣的化学成分
Table 5 Ingredients of three kinds of mold powder after pouring

渣型	碱度(R)	$w[\text{CaO}]/\%$	$w[\text{SiO}_2]/\%$	$w[\text{Al}_2\text{O}_3]/\%$	熔点/ $^{\circ}\text{C}$
A	4.53	34.9	7.7	42.1	>1 300
B	2.43	27.2	11.2	35.0	>1 300
C	0.96	27.8	29.0	17.8	>1 300

渣条中的 Al_2O_3 含量较原保护渣有大幅增加,是由于钢水中的 $[\text{Al}]$ 与保护渣液渣中的 SiO_2 发生化学反应,导致液渣中的 Al_2O_3 逐渐增加,渣条逐渐增厚。大厚度的渣条又反过来影响液渣的排出,进而进一

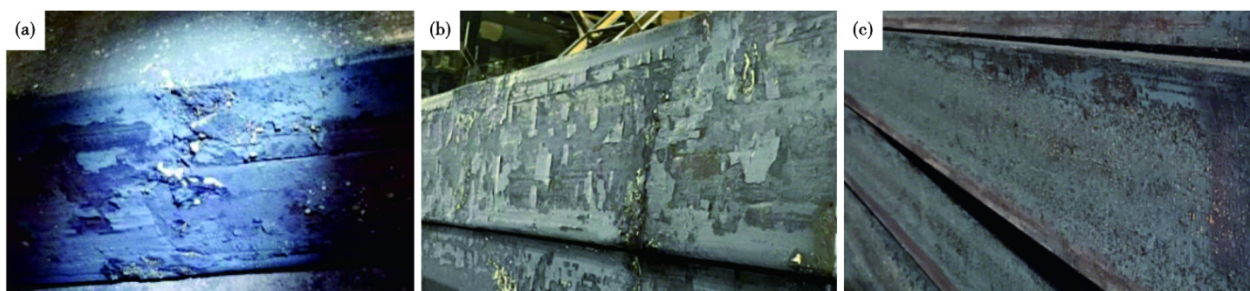


图3 采用不同类型的结晶器保护渣生产时连铸坯的表面形貌:(a)A型渣,(b)B型渣,(c)C型渣

Fig. 3 Surface morphology of continuous casting ingots produced with different types of mold protection slags: (a) A-type slag, (b) B-type slag, (c) C-type slag

步抑制烧结层向液渣层的转变,液渣流入不足导致坯壳与铜管之间的间隙填充不充分,最终导致坯壳不均匀传热。

2.5 连铸坯的表面质量

对使用3种保护渣生产的连铸坯的表面质量进行检测和分析,结果如图3所示。采用A型渣生产的连铸坯表面存在较严重的凹坑,纵向方向上存在超过5 mm深度的划伤,表面质量最差;采用B型渣生产的连铸坯表面存在轻微凹坑,纵向方向上存在2 mm深度的划伤;采用C型渣生产的连铸坯表面表现良好,无明显的凹坑和划伤。

对使用3种结晶器保护渣生产的38CrMoAl钢连铸坯的表面凹坑按照连续拉浇的炉号进行统计,每种分别统计20支连铸坯,结果如图4所示。采用A、B、C型渣生产的铸坯的表面渣坑的总量分别为129个(6.4个/支)、118个(5.9个/支)、6个(0.3个/支)。

采用A、B型保护渣生产的连铸坯的表面渣坑的总量明显高于C型渣,且随着浇注炉数的增加而逐渐增加。原因是随着拉浇炉数的增加,渣条逐渐变厚,铸坯传热及润滑的效果逐渐变差,导致铸坯凹坑缺陷增多。特别指出的是,C渣型在连浇第一炉出现的渣坑数量比较多,且主要集中在前半炉。这主要是因为第一炉钢在浇注时非稳态拉浇过程中保护渣的化渣不良,尚未达到平衡态。

3 结论

研究了3种不同类型的结晶器保护渣对38CrMoAl高铝钢连铸坯表面质量的影响,可得到以

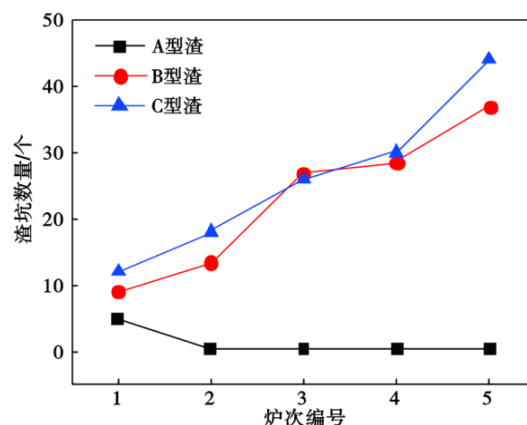


图4 采用不同类型保护渣生产的连铸坯的表面渣坑数量密度

Fig. 4 Number density of slag pits on the surface of continuous casting billets produced with different types of mold slag.

下结论:

1) 碱度为0.38,熔点为1008℃,粘度为0.45 Pa·s的低碱度、低熔点、低粘度性能的保护渣有利于改善浇注过程保护渣的变性,能够显著提升38CrMoAl高铝钢连铸坯的表面质量,可以实现连浇12炉以上。

2) A、B、C这三种类型的结晶器保护渣在浇注过程的消耗量有明显的差异,分别是0.26、0.30、0.45 kg/t。

3) 浇注结束后结晶器保护渣的化学成分会发生明显的变化,碱度为0.38,熔点为1008℃,粘度为0.45 Pa·s的低碱度、低熔点、低粘度性能的保护渣的变化最小,渣条中的 $w[\text{Al}_2\text{O}_3]$ 为17.8%, $w[\text{SiO}_2]$ 为29.0%。

参考文献

[1] 王 鄂,徐建飞,何 西,等. 38CrMoAl钢浇铸过程水口结瘤原因分析及工艺改进[J]. 特殊钢, 2021, 42(2): 38-41.

[2] 李晓军,李 欢,李 振. CaO-SiO₂-Al₂O₃系保护渣加Li₂O对高铝钢20Mn23AlV连铸板坯表面纵裂纹的影响[J]. 特殊钢,

2021, 42(4): 39-41.

[3] 付孝锦,文光华. 高铝钢连铸结晶器保护渣研究概况[J]. 内江师范学院学报,2016,31(4):19-20.

[4] 张宇斌,文光华,于 雄,等. 高铝奥氏体无磁钢 20Mn23AlV 板坯连铸结晶器保护渣的研究[J]. 特殊钢,2013,34(6):22-25.

[5] 于 雄,文光华,唐 萍,等. B₂O₃对高铝钢连铸保护渣理化性能的影响[J]. 重庆大学学报,2011, 34(1): 66-71.

[6] 王 欢. 高铝钢保护渣结晶性能及渣膜传热的研究[D]. 重庆:重庆大学,2010: 91-9.

[7] 王 雷. 大圆坯连铸结晶器渣圈分析及改善[J]. 现代冶金,2017(3): 33-35.

[8] 任 磊,张立峰,王强强,等. 304 不锈钢连铸过程中结晶器渣圈形成机制[J]. 钢铁,2016, 51(8): 35-40.

[9] 王爱兰,刘 平,云 霞. 连铸结晶器保护渣渣圈的探讨[J]. 包钢科技,2006, 32(S1): 36-38.

[10] 邸天成,王杏娟,刘增勋,等. 430 不锈钢用连铸保护渣渣圈形成长大机理分析和控制措施[J]. 特殊钢,2022, 43(5):63-67.

[11] 中谷 枝里香,岩本 行正. Mold Powder for High Al Medium Carbon Steel[J]. Shinagawa Technical Report, Vol. 63 2020.

[12] 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.

版 权 声 明

根据《中华人民共和国著作权法》，作者向《特殊钢》编辑部投稿(或接受约稿)，全体作者同意，上述提交本刊发表的作品一经本刊录用，作者即将作品整体以及附属于作品的图、表、摘要或其他可以从作品中提取部分的全部版权——包括但不限于复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权、改编权，在著作权保护期内转让给《特殊钢》编辑部。本刊所付一次性稿酬已包含上述各种稿酬，若编辑部再以任何形式在任何地点出版该论文，将不再支付作者稿酬。

作者应保证论文是作者独立创作的原创性作品，未曾发表；不涉及侵权和泄密问题；保证论文没有一稿多投；保证论文的署名权无争议，若发生问题，一切责任由作者承担，文责自负。

如有异议，请在投稿前说明，本刊即时处理。