# 针对 ML08Al 小方坯表面质量问题的保护渣性能优化

孙立根[1,2]，樊 赛[1]，朱立光[1,2]，张 奇[1]，韩毅华[1,2]

(1. 华北理工大学冶金与能源学院，河北 唐山 063009; 2. 河北省高品质钢连铸工程技术研究中心，河北 唐山 063009)

**摘 要:** 某钢厂生产的 ML08Al 小方坯铸坯表面缺陷主要表现为角部钩状振痕和表面凹陷。现行保护渣成分和理化性能分析结果表明，渣中 $Fe_2O_3$ 含量较高，导致保护渣保温能力下降、液渣层减薄; 保护渣熔点较高，且出现分熔现象，影响了熔渣熔化的均匀性，易结渣圈; 保护渣不易结晶，恶化了 ML08Al 钢初始凝固时的均匀传热。针对铸坯出现的表面质量问题，明确了保护渣理化性能优化方向和思路，并结合结晶器内钢水凝固热力耦合模型的分析结果，提出适宜的保护渣熔点、黏度、熔速及碱度。实际生产表明，使用优化后的保护渣，铸坯表面质量得到明显改善。

**关键词:** 连铸; ML08Al; 保护渣; 表面凹陷; 角部钩状振痕

**中图分类号:** TF777 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7638(2015)06-0134-07

**DOI:** 10.7513/j.issn.1004-7638.2015.06.025

# Property Optimization of Mould Flux for the Surface Quality Problems of ML08Al Billet

Sun Ligen[1,2], Fan Sai[1], Zhu Liguang[1,2], Zhang Qi[1], Han Yihua[1,2]

(1. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, Hebei, China; 2. Hebei High Quality Steel Continuous Casting Engineering and Technology Research Center, Tangshan 063009, Hebei, China)

**Abstract:** The surface defects of ML08Al billet produced by a Chinese steel plant were dominated by angle hook type of oscillation mark and surface concave. Through the analysis of composition and physicochemical properties of the used mould flux, it was found out that the high level of $Fe_2O_3$ in mould flux would reduce the heat retention, and the liquid slag layer would be thinner. The higher melting point and the fractional melting phenomenon of the mould flux influenced the melting homogeneity of the slag, and the slag-ring readily formed. The mould flux was not easy to form crystallization, this would deteriorate the uniform heat transform for ML08AL initial solidification in the mould. In this research, based on the quality problem of the casting billet, the requirements for physicochemical properties of the mould flux had been fixed. Combining with the calculation of the molten steel solidification in mold via thermal coupling model, the mould flux had been modified in terms of melting point, viscosity, melting rate and alkalinity of the mould flux. The surface quality of the casting billet had been improved significantly by using the optimized mould flux.

**Key word:** continuou casting, ML08Al, mould flux, surface concave, angle hook type of oscillation mark

**收稿日期:** 2015-07-11

**基金项目:** 河北省自然科学基金资助项目(E2014209144)。

**作者简介:** 孙立根(1983—)，男，河北张家口人，副教授，工学博士，主要从事现代炼钢连铸工艺控制及理论研究。

## 0　引言

ML08Al 是冷镦钢系列的代表钢种之一，由于其在制造紧固件时效率高、质量好、成本低，因此得到了广泛的应用。就凝固特性而言，ML08Al 钢凝固区间小，凝固速度快，凝固过程单位温降收缩量大，导致弯月面区域收缩量大；而且 ML08Al 含碳量 0.05% ~0.1%，属于亚包晶钢范畴，其典型特征就是在凝固过程中会发生包晶反应，即发生凝固收缩的同时还伴随有包晶相变收缩。因此对于 ML08Al 钢的浇铸，在初始凝固过程中必须保证均匀传热[1]，一方面保证结晶器的合理锥度，另一方面选用性能合适的保护渣，以防止局部收缩过大引起的各类表面质量问题。

国内某钢厂在生产 ML08Al 时，为进一步降低成本，采用了小方坯连铸，铸坯断面 160 mm×160 mm。但生产中发现铸坯普遍存在表面凹陷、深振痕[2]和角部钩状振痕等表面质量缺陷，考虑到该厂结晶器管理水平较高，因此这些质量问题极有可能与保护渣性能不合适有关。

针对上述问题，本研究系统分析了该厂浇铸 ML08Al 现行保护渣的关键理化性能参数，并在此基础上结合铸坯表面质量缺陷成因和结晶器内钢水凝固热力耦合模型计算结果，给出保护渣性能优化方向指标，以期改善现有铸坯质量问题。

## 1　铸坯主要表面缺陷分析

某钢厂在使用测试保护渣浇铸 ML08Al 小方坯（160 mm×160 mm）时，浇注温度控制在 1 550 ~ 1 565 ℃，铸坯表面缺陷主要表现为角部钩状振痕和表面凹陷[3]。

如图 1 所示，表面凹坑主要出现在铸坯内弧，靠近铸坯角部，属于偏离角凹陷。凹坑的出现不规律，但位置基本一致。伴随铸坯表面凹坑的出现，往往在凹坑谷处有裂纹和穿钢出现。从保护渣角度出发，对于 ML08Al 这类亚包晶钢种，需改善保护渣的结晶特性，以控制传热的均匀性。

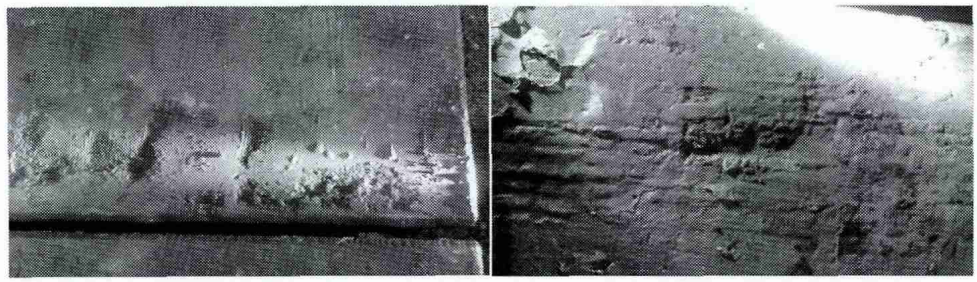

图 1　小方坯表面凹坑形貌

Fig. 1　Concave of the billet surface

图 2 是小方坯的表面振痕情况。从图 2 可以看出，铸坯角部钩状振痕[4]极大，这与保护渣的熔化性能和保温性能有很大的关系。

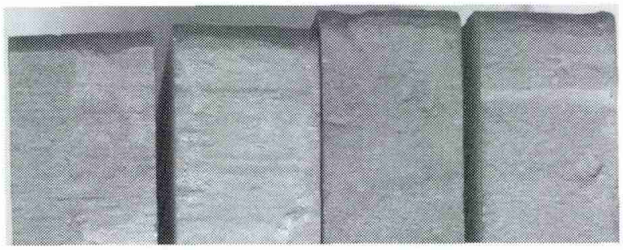

图 2　小方坯表面振痕形貌

Fig. 2　Vibration mark on billet surface

## 2　现行保护渣性能分析

针对铸坯出现的表面质量问题，本研究在检测保护渣化学成分的基础上，系统分析了保护渣的熔化性能、黏度和结晶性能，具体分析结果如下。

### 2.1　化学成分

采用 ICP 对 ML08Al 钢连铸用保护渣进行成分分析，其结果如表 1 所示。由测试结果可以看出，除 $Fe_2O_3$ 有较大差距外，其他化学成分测试结果和质保书基本吻合。但 $Fe_2O_3$ 含量增多会导致保护渣保温能力下降，液渣层减薄，进而增加表面缺陷产生的几率。

表 1 质保书和检测得到的保护渣成分

Table 1 The specified and measured mould flux compositions

| | 保护渣成分/% | | | | | | | | | *R* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | MgO | $MnO_2$ | $Fe_2O_3$ | C | $Na_2O$ | CaO | $K_2O$ | |
| ICP | 39.49 | 4.39 | 2.37 | 0.39 | 3.23 | 6.98 | 4.33 | 34.20 | 0.82 | 0.87 |
| 质保书 | 39.62 | 3.86 | 2.30 | 0.38 | 0.80 | 6.91 | 4.08 | 33.96 | | 0.86 |

### 2.2 熔化特性

采用半球点法对保护渣熔化温度和熔化速度进行研究。半球点实际上代表的是保护渣熔化过程中的某一温度，被测试试样达到这一温度时，试样中产生的液相量和流动性正好把其余物相带动下沉变形到半球形，此时的温度就为半球点温度。

利用半球点法测保护渣熔点和熔速，需首先将去碳后的保护渣研磨至 74 μm(200 目)，然后将粉渣与成型黏结剂混匀，压制成 Ø3 mm×3 mm 的圆柱试样。将试样充分干燥后，置于刚玉垫片上放入炉内加热测量[5]。某保护渣试样升温过程中熔化进程如图 3 所示。从图 3 可以看出，该保护渣圆柱在温度上升到 1 208 ℃时开始熔化，1 217 ℃时形成半球形，对应温度即为保护渣的半球点温度，至 1 276 ℃时保护渣圆柱完全熔化。从开始到完全熔化耗时 65 s，即保护渣熔速为 65 s。先后三组试验的测试结果如表 2 所示。

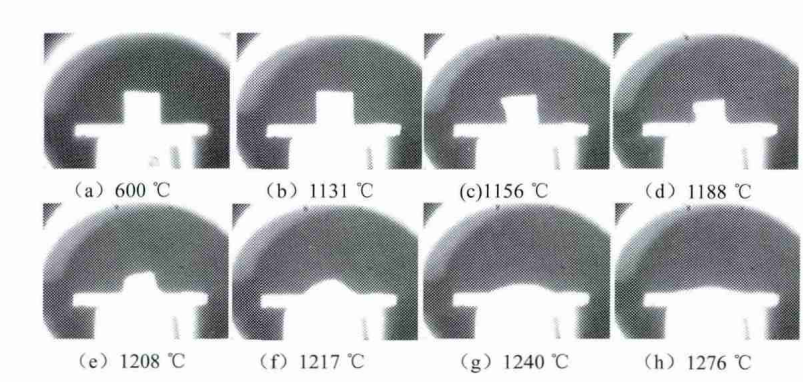


图 3 保护渣试样升温过程中高度变化情况

Fig. 3 Height changes of mould fluxes samples in the process of heating up

表 2 小方坯保护渣熔化特性测试结果

Table 2 The measured melting characteristics of mould flux for billet

| 渣样 | 初始熔化温度/℃ | 半球点温度/℃ | 流动温度/℃ | 熔速/s |
|---|---|---|---|---|
| 第一次 | 1 208 | 1 218 | 1 277 | 64 |
| 第二次 | 1 207 | 1 215 | 1 273 | 66 |
| 第三次 | 1 208 | 1 217 | 1 276 | 65 |
| 平均值 | 1 208 | 1 217 | 1 275 | 65 |

从表 2 可看出，该小方坯保护渣的平均熔点为 1 217 ℃，比质保书的标出值 1 147 ℃高 70 ℃。究其原因，主要是测试过程中发现保护渣存在明显的分熔现象，即部分低熔点成分首先熔化而流失，而余下的组分就要在更高的温度下才能熔化。这也说明保护渣组分不匀，故测得的熔点较高。分熔易引起保护渣过渡层和熔渣层组成成分的变化，还可能恶化过渡层性状，改变熔渣的热物性和凝固特性，使得在初生凝固坯壳形成之前先形成了薄厚不均的渣壳，增加渣圈形成倾向。

### 2.3 黏度特性

本研究利用 Brookfield 旋转黏度计测试保护渣黏度。测试过程将盛保护渣的石墨坩埚置于 $MoSi_2$ 高温炉内，在高于连铸保护渣熔化温度的条件(1 300 ℃)下，将石墨圆柱体浸入保护渣熔体，通过测试圆柱体的转矩测定熔渣黏度[6]，测试结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出，保护渣黏度平均值为 0.804 Pa·s，而质保书提供数据为 0.535 Pa·s，与实测相差较大。对于 ML08Al 钢的连铸而言，为了改善坯型的振痕，保护渣黏度应适当提高，小方坯保护渣黏度在 0.80 Pa·s 左右较为合适。

### 2.4 结晶特性

本研究用 SHTT-Ⅱ型熔化结晶温度测定仪测定保护渣的结晶温度，该设备通过观察 U 型双铂铑丝的 U 型端，判断和测试保护渣的结晶情况及结晶特性。为确保测试准确性，每次试验前需用纯物质

$K_2SO_4$ 标样进行标定，并对设备参数进行修正。每组试样测试 3 次，每次更换一副铂铑热丝。试验过程中试样的变化情况及结晶温度的判断情况如图 5 所示，控温示意图如图 6。

经测试，该保护渣的结晶温度为 1 170 ℃，结晶孕育时间 23 s，临界冷却速度 9 ℃/s，从测试数据上看，该保护渣相对不容易结晶。

## 3　对保护渣理化性能优化

本研究在分析铸坯质量的基础上，利用 Ansys 大型有限元分析软件，建立了基于实际生产工艺和浇铸钢种的二维凝固耦合模型，以期提出更为精确的保护渣理化性能优化指标。

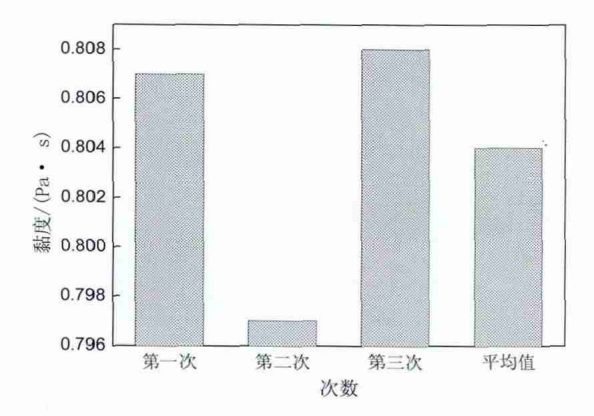


图 4　小方坯保护渣黏度测试结果

Fig. 4　The measured viscosity of mould fluxes for billet

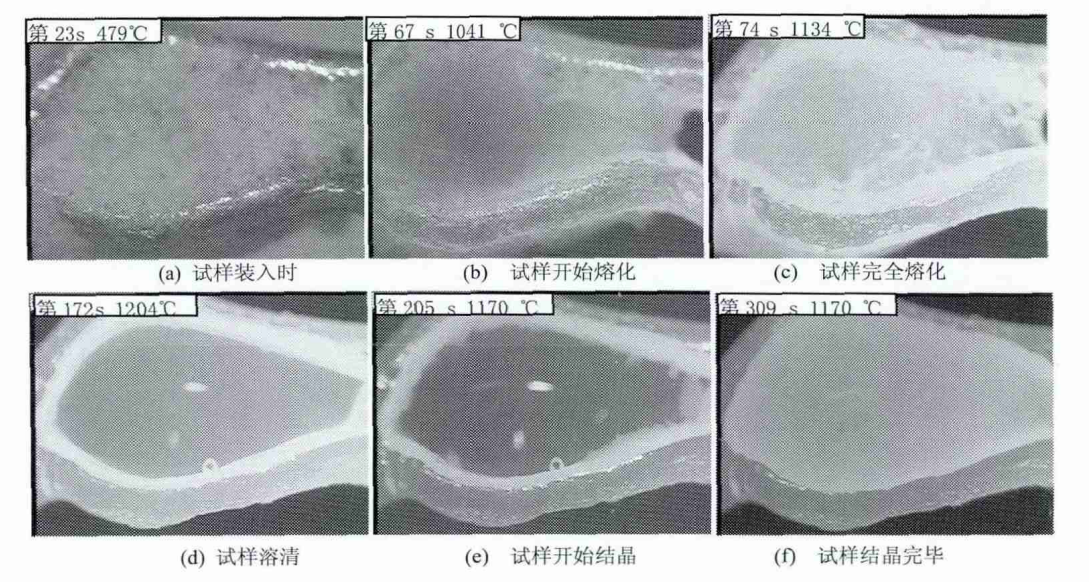


图 5　保护渣熔化过程

Fig. 5　Melting process of mold flux

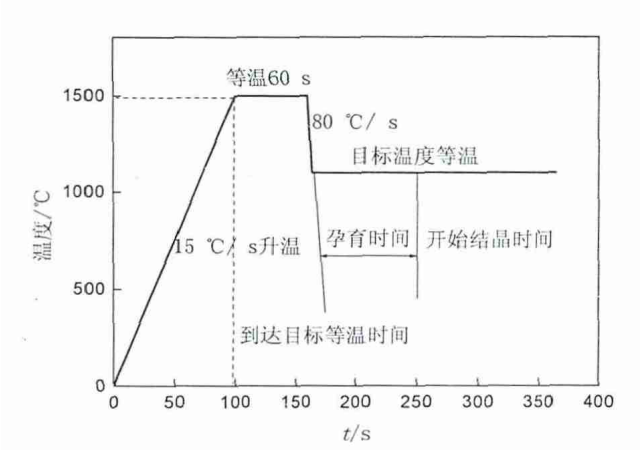


图 6　温控示意

Fig. 6　Schematic temperature control process

### 3.1　数学模型的建立及结果分析

基于小方坯的对称性原理，取 1/4 横截面为研究对象，所选取实体及网络单元格划分情况如图 7 所示，具体的计算结果分析如下。

#### 3.1.1　结晶器出口处铸坯温度场分析

图 8 是结晶器出口处铸坯温度场的分布云图。从图 8 可以看出，除铸坯角部温度相对较低外，整个铸坯温度场较为均匀，不存在明显热点。图 9 为结晶器出口处对应位置的铸坯表面温度分布情况。从图 9 可以看出，虽然铸坯角部温度相对较低，但仍然达到了 1 000 ℃以上，温度最高点为铸坯表面中心，达到 1 160 ℃，就小方坯而言，温度梯度变化不大。

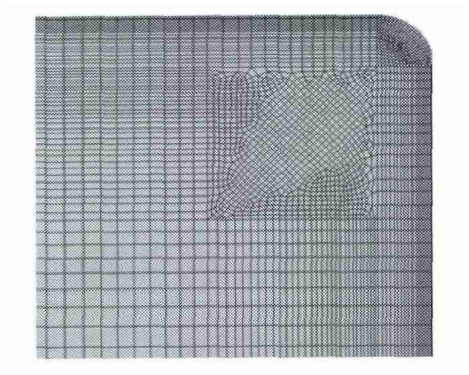

**图 7 单元格划分**
Fig. 7 Cell mesh

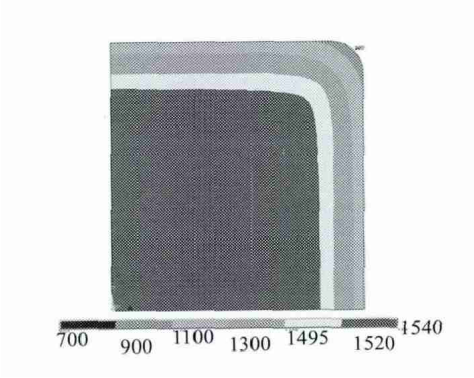


**图 8 结晶器出口铸坯温度场**
Fig. 8 Temperature field of slab at Mold exit

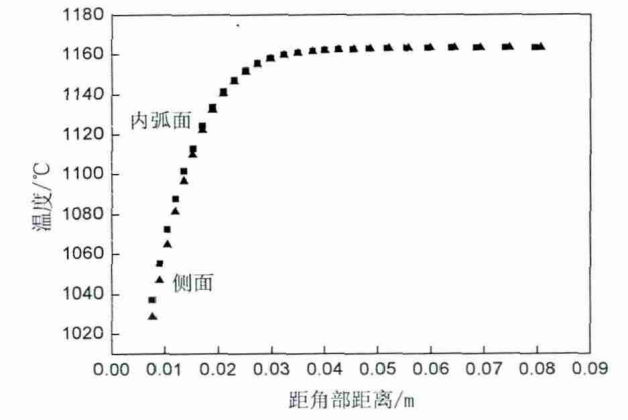


**图 9 结晶器出口坯壳表面温度分布**
Fig. 9 Temperature distribution of solidified shell at mold exit

由于模型是在假设保护渣填充完好的前提下进行分析的，因此上述结果反映更多的是浇铸工艺和结晶器冷却效果的好坏。因此通过上述分析可知，实际浇铸工艺和所使用结晶器铜管锥度适合 ML08Al 小方坯断面的浇铸。所产生的铸坯质量问题应主要从保护渣理化性能优化着手。

3.1.2 铸坯表面温度变化分析

图 10 为拉坯方向上坯壳表面温度的分布情况。

从图 10 可以看出，当铸坯行至在结晶器中下部时，无论是角部还是表面，液态润滑均已完全消失。对于表面温度，在距弯月面 630 mm 以下，其温度低于保护渣熔点(1 217 ℃)，液态渣层完全消失；对于角部温度，在距弯月面 330 mm 以下，温度就已低于保护渣熔点，保护渣完全凝固。因此，保护渣的熔点应适当提高。

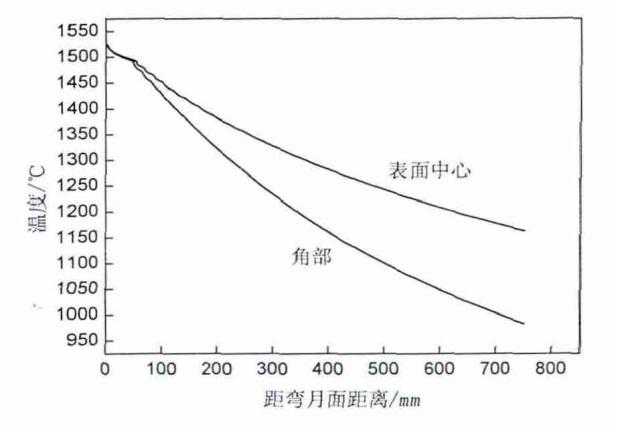


**图 10 沿拉坯方向上坯壳表面温度分布**
Fig. 10 Surface temperature distribution along the direction of casting billet

3.2 保护渣性能优化

3.2.1 熔点

熔点是反映保护渣熔化性质的一个重要指标，主要取决于原料成分及碱度[7]。一般来说，熔点降低，渣耗量增大，液渣膜变厚，足够厚度的液渣膜能保证结晶器内较长的润滑长度，从而使得铸坯与结晶器间的摩擦力减小，有利于保护渣对铸坯的润滑，但熔点太低又会使得液渣层过厚，同样会引起铸坯产生裂纹、凹坑等表面缺陷。因此，实际生产过程中应选择适宜的熔点。

钢液在结晶器内凝固的数值模拟结果表明，当前工艺条件下，小方坯出结晶器时坯壳宽窄面中心点的温度大大低于相应保护渣的熔点。出结晶器时，小方坯表面中心温度为 1 163 ℃，对应的保护渣熔点为 1 217 ℃。因此在当前拉速下，保护渣熔点应相应降低。

3.2.2 黏度

保护渣黏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。

黏度值的大小合适保证熔渣能够顺利填入结晶器与铸坯间的通道，渣膜[8]具有适宜厚度，可保证合理的传热和润滑[9]铸坯。如果黏度过低会使渣膜增厚且不均匀，铸坯易产生裂纹；黏度过高，熔渣的流动[10]性能变差，又会使液渣流入困难使渣膜变薄润滑不良。黏度主要由成分和温度[11]决定，当温度一定时保护渣的黏度主要决定于熔体结构。

对于 Ml08Al 这类含铝钢种的浇铸，一方面液渣吸收钢液上浮的夹杂物后，$Al_2O_3$ 含量会升高，导致液渣黏度的增加；另一方面钢液中的 Al 会还原保护渣中的 $SiO_2$，亦会导致保护渣中 $Al_2O_3$ 含量的升高，影响液渣的黏度。因此保护渣初始黏度的确定要充分考虑到所浇铸钢种的特点，针对 Ml08Al 浇铸用保护渣，其初始黏度应适当降低。

3.2.3　熔速

熔化速度用来衡量保护渣熔化过程的快慢。保护渣的熔化速度决定了钢液面上形成液渣层的厚度和渣的消耗量。如果熔化速度过快，粉渣层不易保持，使热损失增大，液渣面易结壳，可能导致加渣。熔化速度过慢则形成液渣层过薄，不能形成稳定均匀的渣膜，并保证良好的润滑。

铸坯产生表面凹坑主要是因为结晶器[12]弯月面局部位置熔渣过量流入，结晶器四壁导热不均匀所致，在浇注诸如 ML08Al 钢等凝固时线收缩量较大的钢种时尤为明显。究其原因，主要是保护渣熔速较快，熔渣过早裸露在大气中，钢液热量损失大，造成结晶器上部横断面局部钢液过冷，对应的坯壳因收缩而形成横向凹坑。针对 Ml08Al 浇铸用保护渣，可以适当减慢保护渣的熔化速度，以改善保护渣的保温性能。

3.2.4　结晶特性

实际检测结果表明，现行保护渣不易结晶，而对于 ML08Al 这类亚包晶钢，应适当提高结晶化率来控制传热，因此保护渣碱度应适当提高。

综上分析，现将 ML08Al 小方坯保护渣性能[13]指标推荐值如表 3 所示。

表 3　保护渣理化性能指标推荐值

Table 3　The recommended value of physicochemical properties of mould flux

| | 熔点/℃ | 黏度/(Pa·s) | 熔速/s | 碱度 |
|---|---|---|---|---|
| 实测值 | 1 217 | 0.804 | 65 | 0.87 |
| 推荐值 | 1 150±20 | 0.80±0.05 | 75±5 | 0.90±0.05 |

## 4　保护渣优化后铸坯质量

保护渣优化后进行工业试验，对生产出的铸坯加工，用热酸对铸坯表面进行酸洗，如图 11 所示。从图 11 可以看出，与原小方坯相比，铸坯表面质量有了显著提高，主要表现在铸坯表面的振痕变浅且均匀，凹坑缺陷减少。说明优化后的保护渣提高了铸坯表面质量，减少了表面缺陷。

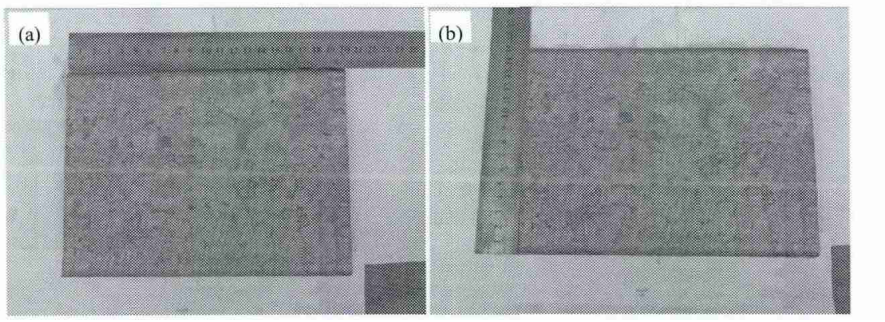


图 11　铸坯表面酸洗的照片

Fig. 11　Photos of billet surface after pickling

## 5　结论

1) 试验检测发现，现行保护渣 $Fe_2O_3$ 含量较高，熔点较高，不容易结晶，易造成 ML08Al 小方坯铸坯表面出现凹坑，振痕深、角部钩状振痕等缺陷，并且与实际生产结果相符。

2) 通过对钢水在结晶器内凝固行为的模拟分析，得出保护渣的熔点应降低至 1 150 ℃±20 ℃，黏度应保持在 0.80 Pa·s±0.05 Pa·s，熔速延长至 75 s±5 s，碱度提高至 0.90±0.05。

3) 保护渣优化后，铸坯质量明显提升，保护渣优化思路和方向正确。

## 参考文献


[1] Li Ligang, Cui Guojun, He Hongjie. Xinggang ML08Al sag of the surface of the control [C] //Hebei Steel Continuous Casting Production Technology and Academic Exchange Meeting Papers. 2012: 106-108.
(李立刚, 崔国军, 和红杰. 邢钢 ML08AL 表面凹陷的控制 [M]. 河北省炼钢一连铸生产技术与学术交流会论文集. 2012: 106-108.)

[2] Wang Heli, Lei Zuosheng. Study on formation mechanism of oscillation mark on CC strand surface [J]. Continuous Casting, 2009 (5): 13-17.
(王贺礼, 雷作胜. 连铸坯表面振痕形成机理研究 [J]. 连铸, 2009 (5): 13-17.)

[3] Wang Wenxue, Wang Yu, Chi Jinghao, *et al*. Surface defects and control measures of satinless steel billet [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2006, 27(3): 63-67.
(王文学, 王雨, 迟景灏, 等. 不锈钢连铸坯表面缺陷与对策 [J]. 钢铁钒钛, 2006, 27(3): 63-67.)

[4] Yang Hao, Tang Ping, Sun Wei, *et al*. Optimizing capability of mould flux to improve the surfacequality of billet for cold forging steel [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2010, 31(2): 88-92.
(杨浩, 唐萍, 孙维, 等. 优化保护渣改善冷镦钢铸坯表面质量 [J]. 钢铁钒钛, 2010, 31(2): 88-92.)

[5] Zhou Xiuli, Chen Min, Yu Jingkun. A new method for measuring the meling point of mould powder [C] //2005 China's Steel Conference Proceedings. 2005: 646-648.
(周秀丽, 陈敏, 于景坤. 保护渣熔点的一种测量方法 [C] //2005 中国钢铁年会论文集. 2005: 646-648.)

[6] Hu Zhiyong. Study and application of mold fluxes for quality steel development in ShuiGang [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
(胡志勇. 水钢品种钢连铸保护渣的研究及应用 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.)

[7] Wang Xingjuan, Liu Ran, Zhu Liguang. Research on solidification behavior and mold flux property of SCM435 steel [J]. Foundry Technology, 2013, 34(6): 672-674.
(王杏娟, 刘然, 朱立光. SCM435 钢凝固行为及保护渣性能研究 [J]. 铸造技术, 2013, 34(6): 672-674.)

[8] Cai E. Study on influence of physieal-chemistry properties frieation of continuous casting fluxeson force between slab and mold [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
(蔡娥. 保护渣物理性能对铸坯与结晶器间摩擦力影响的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2004.)

[9] Chen Tianming. Development of mold powder for 09CuPRE series steel [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2004, 25(2): 35-39.
(陈天明. 09CuPRE 系列钢用连铸保护渣的研制 [J]. 钢铁钒钛, 2004, 25(2): 35-39.)

[10] Wu Shoufang, Xu Dehong, Tang Xiuhong. The study on mold powder fiuidity [C] //Seventh (2009) China's Steel Conference Proceedings. 2009: 556-560.
(武守防, 徐德红, 汤秀红. 结晶器保护渣流动性的研究 [C] //第七届(2009) 中国钢铁年会论文集. 2009: 556-560.)

[11] Liu Chengjun, Jiang Maofa. Insulation capacity of mold powder [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2002, 14(3): 1-4.
(刘承军, 姜茂发. 连铸保护渣的绝热保温性能 [J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(3): 1-4.)

[12] Zhu Liguang, Jin Shangtong. Mould flux for high speed casting [J]. Iron and Steel, 1998, 33(8): 68-71.
(朱立光, 金山同. 高速连铸工艺中的结晶器保护渣技术 [J]. 钢铁, 1998, 33(8): 68-71.)

[13] He Shengping, Wang Lijuan, Wang Qian, *et al*. Discussion on serialization of mold fluxes for continuous casting billets in shuicheng steel [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2009, 30(1): 64-67.)
(何胜平, 王丽娟, 王谦, 等. 水钢方坯连铸保护渣系列化探讨 [J]. 钢铁钒钛, 2009, 25(1): 64-67.)


编辑 余文华