

结晶器电磁搅拌对方坯中非金属夹杂物去除的影响研究

王 勇

(四川机电职业技术学院材料工程系, 四川 攀枝花 617000)

摘 要:电磁力影响金属熔体中非金属夹杂物的分布及颗粒的传输速度, 根据这一原理, 进行了结晶器电磁搅拌对方坯中非金属夹杂物去除影响的试验研究。采用 200、250 A 和 300 A 这 3 种不同的 EMS 电流对方坯坯料进行了夹杂物分离和去除的试验, 并采集样品进行能谱分析。结果表明, 当结晶器的电磁搅拌参数为 300 A 电流和 3 Hz 频率时, 铸坯中的非金属夹杂物控制效果最佳, 比不采用电磁搅拌减少了 35%。

关键词:连铸; 结晶器; 电磁搅拌; 非金属夹杂物

中图分类号: TF777

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)01-0131-04

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.01.020

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on the effect of electromagnetic stirring of mold on the removal of non-metallic inclusions in billet

Wang Yong

(Department of Materials Engineering, Sichuan Institute of Mechanical and Electrical Technology, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Based on the principle that electromagnetic force affects the distribution of non-metallic inclusions and the velocity of particles in molten metal, the effect of electromagnetic stirring in mold on the removal of non-metallic inclusions in billet was studied. The inclusion separation and removal experiments were carried out by using EMS current of 200, 250 and 300 A, and the samples were collected for energy spectrum analysis. The results show that the best control effect of non-metallic inclusion in the billet is obtained when the electromagnetic stirring parameters of the mold are 300 A current and 3 Hz frequency, which is 35% less than that without electromagnetic stirring.

Key words: continuous casting, crystallizer, electromagnetic stirring, non-metallic inclusion

0 引言

方坯的洁净度和夹杂物控制一直是炼钢过程和炼钢领域的主要关注热点, 炼钢过程中产生的夹杂物对钢的质量影响很大^[1-5]。夹杂物的存在会导致钢的成分、组织和性能分布不均匀。因此, 在不同的应用场合, 它会恶化钢制品的力学性能和疲劳性能^[6-7]。对钢的机械性能如硬度、成形性、可加工等

性能有害。钢中的夹杂物主要是非金属化合物, 如硫化物、氧化物、硅酸盐等^[8-9], 是由钢中溶解的元素之间的反应或其他来源如松散的杂质、破碎的耐火材料和陶瓷衬里颗粒污染钢而产生的。电磁搅拌 (EMS) 作为控制凝固过程的有效手段, 相关文献^[10-11]关注电磁搅拌对铸坯的凝固组织、成分偏析、中心疏松及缩孔的影响, 对于电磁搅拌对夹杂物的去除影响报道较少。笔者针对这种状况, 主要侧重

于检测和表征低合金高强度钢的非金属夹杂物,探讨了低合金高强度钢在结晶器电磁搅拌过程中非金属夹杂物的分离理论及结晶器电磁搅拌器的最佳操作参数。

1 去除夹杂物原理及试验工艺

1.1 电磁搅拌去除夹杂物原理

电磁力会影响熔融金属中非金属夹杂物粒子的分布。如果电流或磁场的方向和大小发生改变,非金属粒子受到的应力的方向和大小也会发生改变^[1]。这将影响颗粒的传输速度,即颗粒与凝固界面之间的相对传输速度的变化,进而影响铸坯^[1]中夹杂物的分布。电磁力对结晶器内夹杂物分布的影响如图1所示。在不同力的作用下,钢水中的粒子将经历两个速度分量:垂直分量 v_n 和水平分量 v_r 。粘性阻力会沿这两个方向产生力分量,从而达到平衡。根据文献[5],当凝固速度大于运动速度 v_p ,粒子(图1中以夹杂物B表示)被吞没在凝固前沿内。在相反的条件下(图1中包含A),粒子将向前移动。 v_p 的大小是由粒子的应力条件决定的,而速度 v_p 会影响固体钢内颗粒的分布。通过施加电磁场,可以实现对粒子的应力变化,因为电磁力可以得到比现有施加在粒子上的其他力大得多的值。由于电磁力可以为钢液中的粒子产生一个超过粒子被凝固液体吞没的临界速率的传输速度,这种电磁力可以用来增强潜在夹杂物从熔融金属中的分离。

与电磁搅拌有关的旋转磁场在钢水中产生旋转运动。这种旋转运动所产生的漩涡促进夹杂物远离

钢水的外缘,并促进它们向上移动到渣相层,在渣相层被收集起来。弯月形振动引起的弯月形区域内炉渣的滞留往往会在钢表面产生夹杂物。通过选择合适的位置来调整弯月面振动,以减少弯月面缺陷发生夹渣。因此,电磁搅拌可以加强从钢水中去除非金属夹杂物,这些夹杂物来源于脱氧产物、再氧化产物、难熔侵蚀材料、夹渣或喷嘴堵塞的结块^[6-8]。

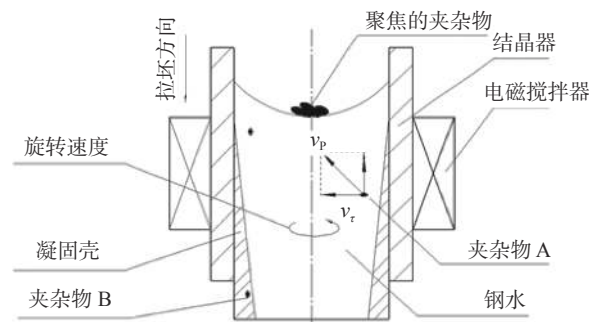


图1 电磁力对钢液中央夹杂物分布的影响
Fig. 1 Influence of electromagnetic force on the distribution of inclusions within molten steel

1.2 试验工艺

EMS安装在结晶器顶部以下300 mm处,并连接到一个外部三相交流电源,工作频率可调;搅拌方向为顺时针;通过调整施加电流和电流的频率,可以改变搅拌强度。EMS的基本额定参数是功率4.8 kW,额定电流400 A,额定电压310 V,EMS频率2~8 Hz。试验在年产60万t钢的方坯连铸机上进行,铸坯断面150 mm×150 mm,试验钢种为ML35钢,共试验9个炉号,每个炉号对应一个浇注工艺参数和电磁搅拌参数,浇注工艺参数见表1。

表1 连铸浇注工艺参数
Table 1 Process parameters for the continuous casting

炉批号	平台温度/℃	中包温度1/℃	中包温度2/℃	中包温度3/℃	中包平均温度/℃	过热度/℃	拉速/(m·min ⁻¹)
1	1 569	1 545	1 540	1 535	1 540	29	1.95
2	1 565	1 540	1 535	1 531	1 535	24	1.95
3	1 570	1 545	1 540	1 536	1 540	29	1.95
4	1 567	1 541	1 535	1 529	1 535	24	1.95
5	1 566	1 540	1 535	1 530	1 535	24	1.95
6	1 569	1 545	1 540	1 534	1 539.7	28.7	1.95
7	1 567	1 542	1 536	1 529	1 535.7	24.7	1.95
8	1 560	1 538	1 530	1 525	1 531	20	1.95
9	1 562	1 539	1 533	1 528	1 533.3	22.3	1.95

2 结果与讨论

通过对比试验,分析了不同电流强度对方坯中

夹杂物去除的影响。考虑到连铸结晶器的额定EMS电流为400 A,在3 Hz的EMS频率下,试验所用的EMS电流分别为0、200、250、300 A。测定

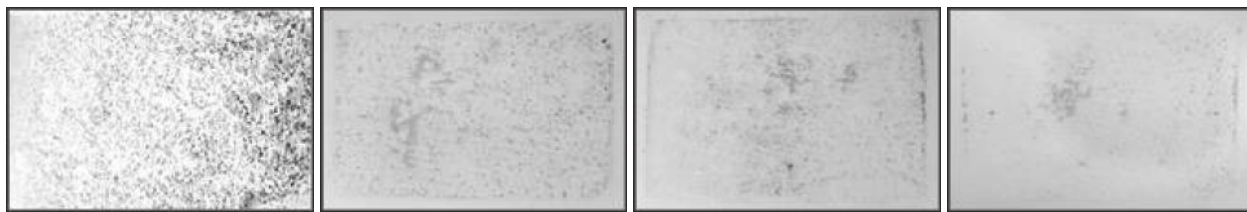
了 120 个方坯样品, 并对其进行了能谱分析, 研究了不同搅拌电流对方坯中夹杂物去除的影响。

2.1 电磁搅拌对非金属夹杂物去除的影响

采用 3 种不同的 EMS 电流 200、250 A 和 300 A 对方坯坯料进行了夹杂物分离和去除试验, 并采集样品进行能谱分析。钢中的缺陷, 如夹杂物、偏析、气孔、针孔等, 由于其尺寸小或塑性变形, 使其与钢基体相连, 肉眼难以识别。研究采用合适的刻蚀剂对缺陷和钢基体进行选择刻蚀。由于缺陷与基体

的侵蚀程度不同, 样品或纸张上的缺陷颜色与基体的颜色不同, 肉眼即可辨别。结晶器内电磁搅拌过程中非金属夹杂物在方坯坯料中的分布如图 2 所示(放大 40 倍)。

由图 2 可以看出, 当 EMS 频率为 3 Hz, 电流分别为 0、200、250 A 和 300 A 时, 高强低合金钢坯料中的非金属夹杂物逐渐减少。试验结果表明, 当结晶器的电磁搅拌参数为 300 A 电流和 3 Hz 电磁搅拌频率时, 可大大减少铸坯中的非金属夹杂物。



(a) $I=0$ A, $f=0$ Hz; (b) $I=200$ A, $f=3$ Hz; (c) $I=250$ A, $f=3$ Hz; (d) $I=300$ A, $f=3$ Hz

图 2 不同 EMS 电流下夹杂物分布($\times 40$) (酸浸的低倍组织结果)

Fig. 2 Inclusions distribution under different EMS currents ($\times 40$)

2.2 铸坯夹杂物能谱分析

图 3 是能谱样取样位置, 试验中结晶器电磁搅拌参数分别为 $I=200$ A, $f=3$ Hz; $I=250$ A, $f=3$ Hz; $I=300$ A, $f=3$ Hz。

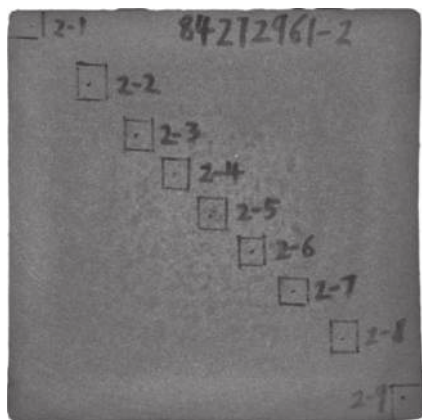


图 3 方坯能谱样取样位置

Fig. 3 Sampling locations of energy spectrum on billet

图 4 是没有采用电磁搅拌时夹杂物能谱。由图 4 可知, 铸坯中的夹杂物从边缘多高熔点夹杂物(如: Al_2O_3 、CaS、高 Al/Ca 比高的钙铝酸盐夹杂), 到心部逐渐变为多低熔点夹杂物(如: MnS 、Al/Ca 接近于 1 的钙铝酸盐夹杂)。夹杂物尺寸多在 $10 \mu m$ 以下, 大尺寸夹杂物多为 Al_2O_3 , 最大尺寸达 $15 \mu m$ 左右。

结晶器电磁搅拌参数 $I=200$ A, $f=3$ Hz 下的铸

坯试验结果见图 5。铸坯夹杂物中出现 SiO_2 、 MgO 。

结晶器电磁搅拌参数 $I=250$ A, $f=3$ Hz 下的铸坯试验结果见图 6, 铸坯边缘有 CaS 夹杂物出现。

结晶器电磁搅拌参数 $I=300$ A, $f=3$ Hz 下的铸坯试验结果见图 7。图 7 显示了钙化效果较好的铝酸钙夹杂物能谱, 在铸坯内部夹杂物数量较少, 有少量的铝酸钙夹杂物, 钙化效果也较好, 铝酸钙在铸坯中部多呈簇状分布。

根据夹杂物能谱分析, 电磁搅拌参数: $I=300$ A, $f=3$ Hz 时的夹杂物能谱分析效果较好。由此可以得知, 随着电磁搅拌强度的增加, 旋转钢水的冲刷作用及夹杂物的向心运动增强, 使铸坯中的夹杂物明显减少, 特别是铸坯皮下部分的夹杂物的减少, 将有利于提高轧制成材后的盘条表面质量。

2.3 对夹杂物含量、分布的影响

在现有工艺条件下, 想完全去除钢中的夹杂物是不可能的, 尽管在炼钢和炉外精炼时可以使夹杂物含量降到较低水平, 但在浇铸的过程中又会生成一些新的夹杂物。从铸坯缺陷产生的机理可知, 铸坯中非金属夹杂物的主要来源是钢水的二次氧化、钢包及中间包的熔渣、结晶器保护渣、水口等熔损形成的外来夹杂物。采用电磁搅拌正是为了降低这些夹杂物的含量。由于一般的夹杂物都比钢液轻, 在电磁力的作用下, 可使它们向液相中心集结并上

浮到弯月面被熔渣溶解。同时,搅拌作用也使得与钢液相接触的保护渣经常得到更新,即使得钢渣之间的接触面积增加,因而上浮的夹杂物容易转移到保护渣中,并被保护渣吸收。

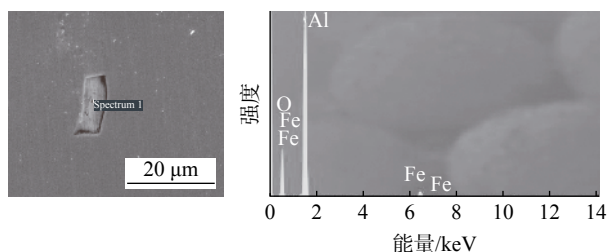


图 4 无电磁搅拌夹杂物能谱图($I=0$ A, $f=0$ Hz)

Fig. 4 Energy spectrum of the inclusion without electromagnetic stirring ($I=0$ A, $f=0$ Hz)

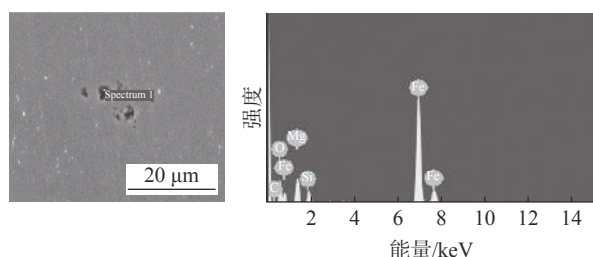


图 5 SiO_2 、 MgO 夹杂物能谱图($I=200$ A, $f=3$ Hz)

Fig. 5 Energy spectrum of the inclusion MgO ($I=200$ A, $f=3$ Hz)

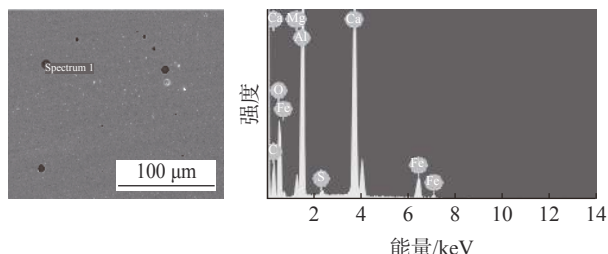


图 6 CaS 夹杂物能谱图($I=250$ A, $f=3$ Hz)

Fig. 6 Energy spectrum of the inclusion CaS ($I=250$ A, $f=3$ Hz)

另外,电磁搅拌还可以使注入结晶器中的钢液浸入深度变浅,使铸坯表层及断面上的夹杂物含量均降低。图 8 是某厂连铸机采用 M-EMS 浇铸前后夹杂物分布对比。由图 8 可以看出,采用 M-

EMS 后,铸坯夹杂物含量大幅度下降。采用锥形样品进行超声波检测的结果为铸坯夹杂物含量减少了 35%。

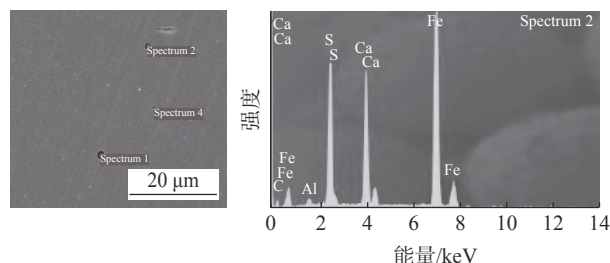


图 7 钙化效果较好的铝酸钙夹杂物能谱图($I=300$ A, $f=3$ Hz)

Fig. 7 Energy spectrum of calcium aluminate inclusions with good calcification effect

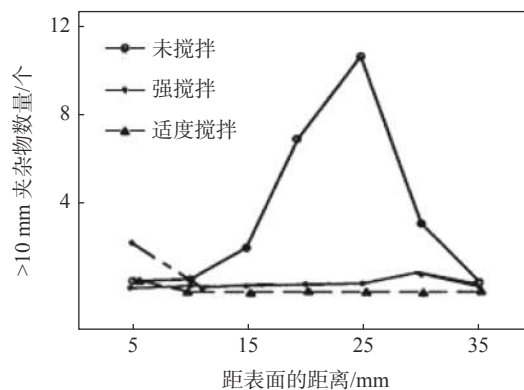


图 8 采用和未采用 M-EMS 对夹杂物分布影响的比较

Fig. 8 Comparison of inclusions distribution with and without M-EMS

3 结论

1) 电磁力影响金属熔体中非金属夹杂物的分布。当电流或磁场的方向和大小改变时,非金属颗粒受到的应力的方向和大小也会发生变化。电磁力影响颗粒的传输速度,进而影响铸件中夹杂物的分布,促使夹杂物从钢液中分离,被去除。

2) 试验表明,电磁搅拌能将方坯中的大部分非金属夹杂物分离。在 300 A 电流和 3 Hz 频率下,方坯中的非金属夹杂物含量比不采用电磁搅拌降低 35%。

参考文献

- [1] Han Zhicheng. Em metallurgy technology and equipment [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
(韩志成. 电磁冶金技术及装备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.)
- [2] Mao Bin, Zhang Guifang, Li Aiwu. Theory and technology of electromagnetic stirring for continuous casting steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
(毛斌, 张桂芳, 李爱武. 连铸铸钢用电磁搅拌的理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.)