

钢中夹杂物去除技术的进展

幸伟 倪红卫 张华 何环宇 成日金

(武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081)

摘要 钢中夹杂物去除的主要环节为夹杂物的长大、上浮和分离。钢中夹杂物去除技术的主要进展有: 气体搅拌-钢包吹氩、中间包气幕挡墙和 RH-NK-RERM 法; 电磁净化-钢包电磁搅拌、中间包离心分离和结晶器电磁制动; 渣洗技术; 过滤器技术。文中分析了各种夹杂物去除技术的冶金功能, 将不同夹杂物去除技术进行合理组合, 实现多功能精炼, 可取得最佳冶金效果。

关键词 钢液 精炼 夹杂物去除技术

Progress on Technique for Removal of Inclusions in Steel

Xing Wei, Ni Hongwei, Zhang Hua, He Huanyu and Cheng Rijin

(Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract Main links for removal of inclusions in liquid steel are inclusion growth, floating and separating. The key progress on technique for removal of inclusion in steel is gas stirring-ladle argon blowing, gas shielding weir and dam in tundish, RH-NK-RERM method; electromagnetic cleaning-ladle electromagnetic stirring, tundish centrifugal separating and mold electromagnetic braking; slag washing and filter technique. The metallurgy functions of each technique for removal of inclusions in steel are analyzed in this article. It is available to get optimum metallurgical effect by reasonably combined different technique for removal of inclusions to carry out multi-function refining.

Material Index Liquid Steel, Refining, Technique for Removal of Inclusions

1 钢中夹杂物的长大、上浮与分离

钢中尺寸较小的夹杂物颗粒不足以上浮去除, 必须通过碰撞聚合成大颗粒, 较大的夹杂物陆续上浮到渣层^[1], 离开钢液。在强湍流下, 夹杂物碰撞聚合非常迅速^[2], 例如在 $0.1 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 的强湍流条件下, 夹杂物半径长大到 $100 \mu\text{m}$ 只要 2 min。直径为 $100 \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 夹杂物从钢液表面下 2.5 m 上浮到钢液表面需要 4.8 min, 直径为 $20 \mu\text{m}$ 的夹杂物, 上浮时间增加到 119 min^[3]。

从钢液中分离夹杂物的主要途径包括两种:

(1) 被表面的渣层吸附; (2) 被壁面耐火材料吸附。

2 钢中夹杂物去除技术

2.1 气体搅拌

2.1.1 钢包吹氩

吹氩搅拌是钢包炉重要的精炼手段之一, 钢中夹杂物被气泡俘获去除的效率决定于吹入钢液中气泡数量和气泡尺寸^[4]。钢包底吹氩用透气砖平均孔径一般为 2~4 mm, 在常用的吹氩流量范围产生的气泡直径为 10~20 mm^[5]。而有效去除夹杂物的最佳气泡直径为 2~15 mm^[3], 并且气泡在上浮过程会迅速膨胀。因此, 底吹氩产生的气泡捕获小颗粒

夹杂物概率很小, 对细小夹杂物去除效果不理想。在钢包底吹氩过程中, 过强的搅拌功会导致钢水的二次氧化及卷渣。

为了去除钢中的细小夹杂物颗粒, 必须钢液中制造直径更小的气泡。将氩气引入到足够湍流强度的钢液中, 依靠湍流波动速度梯度产生的剪切力将气泡击碎, 可将大气泡击碎成小气泡。钢包与中间包之间的长水口具有高的湍流强度, 在此区域钢水流速达到 1~3 m/s。在长水口吹氩水模型研究表明^[6], 可获得 0.5~1 mm 的细小气泡。细小的气泡捕获夹杂物的概率很高。这种方法可显著提高氩气泡去除夹杂物的效率。

2.1.2 中间包气幕挡墙

通过埋设于中间包底部的透气管或透气管向钢液中吹入的气泡, 与流经此处的钢液中的夹杂物颗粒相互碰撞聚合吸附, 同时也增加了夹杂物的垂直向上运动, 从而达到净化钢液的目的。

德国 NMSG 公司的应用结果表明, 与不吹气相比, 50~200 μm 大尺寸夹杂物全部去除, 小尺寸夹杂物的去除效率增加 50%^[7]。为了获取细小气泡, 新日铁研制了一种旋转喷嘴, 借助耐火材料制的旋转叶轮, 使吹入中间包的气泡分裂成微细气泡, 与传

统的中间包设置挡墙法相比,小于 50 μm 的夹杂明显减少^[8]。

本溪钢厂中间包底吹氩试验证实^[9]:底吹氩形成的气幕挡墙对夹杂物去除效果明显,同不吹氩相比,铸坯中夹杂物数量下降 50%,而且未观察到 30~50 μm 的夹杂物。

2.1.3 加压减压法

加压减压法(NK-PERM)是日本钢管公司开发的精炼法^[10],采用顶吹喷枪和包底透气砖吹氮和氢强制性的溶解在钢水中,使钢中的氮或氢增到 $(150\sim 400)\times 10^{-6}$,然后在RH真空循环脱气装置中脱气去夹杂。钢中过饱和的氮或氢在迅速减压过程中析出,形成微小气泡促使夹杂物上浮。与传统的钢包吹氩相比,钢中夹杂物平均尺寸明显减小,且直径在 10 μm 以上的夹杂颗粒全部去除。

2.2 电磁净化

2.2.1 钢包电磁搅拌

瑞典 ASEA 公司与 SKF 公司,于 1965 年建成了第 1 座采用电磁感应搅拌的钢包精炼炉 ASEA-SKF。用此方法生产钢的总氧量可小于 20×10^{-6} ,夹杂物显著减少。

国内冶金工作者在对 90 t LF-VD 钢包精炼电磁搅拌的试验表明^[11],电磁搅拌在降低尺寸在 20 μm 以下的非金属夹杂物与吹氩搅拌相比有显著的优越性,非金属夹杂物不论颗粒大小,都能以较快速度从钢液中排除。此外,电磁搅拌能量分布均匀,流场基本无死角。

一般来说,电磁搅拌比气体搅拌更容易准确掌握,和气体搅拌相比,对钢渣界面的搅动强度还不够大。电磁搅拌使钢液的流动比较稳定、均衡,避免钢水流速过大导致的卷渣。但电磁搅拌不能提供促使夹杂物上浮的气泡。

2.2.2 中间包离心分离

利用夹杂物与钢液的密度差,可以用离心场中分离夹杂物。在旋转的钢液中,由于夹杂物密度比钢液小,夹杂物会向心运动,在钢液中心聚集长大、上浮。钢液的旋转可以通过旋转磁场产生^[12]。

20 世纪 90 年代,日本在中间包中进行旋转磁场离心分离夹杂物的试验^[13],离心流动中间包分为圆筒形旋转室和矩形室,钢水由钢包长水口进入旋转室,在旋转区受电磁力驱动进行离心流动,然后从旋转区底部出口进入矩形室进行浇铸。离心搅拌后全氧由 $(20\sim 40)\times 10^{-6}$ 降到 $(8\sim 15)\times 10^{-6}$,夹杂物总量约减少一半。

2.2.3 结晶器电磁制动

电磁制动是利用向上的电磁力阻止从浸入式水口流出的钢液并改变其方向,借此减小钢液的穿透深度,促使夹杂物上浮分离,同时,抑制弯月面的波动,防止卷渣。

20 世纪 80 年代,瑞典 ASEA 公司与日本川崎公司联合开发的板坯结晶器电磁制动技术,取得较好效果。90 年代,成功开发出两段电磁制动技术,上段用于抑制弯月面的波动,下段用于制动高速流股。近年来又开发出了全幅三段电磁制动技术^[14],将下段磁场用于二次制动,日本川崎钢铁公司在采用电磁制动后,即使在 2.5 m/min 以上高速连铸时,结晶器内的保护渣也不会卷入钢液中。

国内梅钢 2 号连铸机采用全幅两段电磁制动技术,使用效果表明^[15]:采用电磁制动后,结晶器液面波动幅度明显降低,铸坯夹杂物数量较少且尺寸 $\leq 20\ \mu\text{m}$ 。

2.3 渣洗

渣洗通过控制炉渣成分处理钢液,是最早出现的二次精炼方法^[16]。由于精炼渣可以吸附夹杂物,为了保证渣洗的效果,一般要进行搅拌。渣洗通常与其它工艺操作配合使用。

电渣重熔是在渣洗基础上发展起来的一项新技术。在电渣重熔过程中,自耗电极的端部熔化的金属汇集成液滴,分散细小的熔滴穿过渣层并最终进入金属熔池,使金属液与熔渣的接触界面显著增加^[17]。而且,电极端头温度高达 1 800 $^{\circ}\text{C}$,原有的固态夹杂一般均能变成液态,更容易被渣吸附。经电渣重熔的 GCr15 钢轴承的寿命是电炉钢轴承的 3.35 倍^[18]。

2.4 过滤器

过滤器主要通过机械拦截、表面吸附的作用去除夹杂物^[8]。夹杂物的去除率与过滤器的材质、过滤器孔径和钢水流速有关^[19,20]。美国 SELEE 钢铁公司研制的过滤器应用在中间包上,夹杂物去除效率提高 40%~80%。日本千叶厂研制的陶瓷狭孔过滤器^[21],在最佳情况下能全部去除 $\geq 20\ \mu\text{m}$ 的夹杂。

国内对钢水过滤器进行的研究也取得了较好的效果^[22]。宝钢在中间包上使用 CaO 质过滤器,采用有向上倾斜角度的小孔,以增加渣吸附夹杂的机会,使用后发现对去除夹杂物中 Al_2O_3 、 SiO_2 作用显著,可使中间包第 3、第 4 流钢水 T[O] 分别降低 25% 和 10%。

目前,过滤器的制作工艺比较复杂,生产成本较

高,过滤器的比表面积有限,难以满足钢水连续过滤的要求,也仅限应用于高纯净度高价位钢材的生产。应当用其它措施尽可能多去除一些夹杂,剩余的难去除的小型夹杂,再通过过滤器去除。随着过滤器越来越多的应用于生产,为钢铁工业提供优质、廉价、长寿的过滤器成为今后的研究重点。

3 钢中夹杂物去除技术的冶金功能比较

随着夹杂物去除技术的不断进步,由最初的渣洗发展到气体搅拌、电磁净化和过滤器等方法,应用范围也涵盖了从钢包炉、中间包到连铸工艺过程。冶金功能及处理效果取得了巨大进展。夹杂物去除技术的冶金功能比较见表 1。

表 1 不同夹杂物去除技术的冶金功能比较
Table 1 Comparison between metallurgical functions of different technique for removal of inclusions

处理方法	主要功能	适合工艺	对夹杂物影响			夹杂物处理效果	生产调节	不足
			长大	上浮	分离			
气体搅拌	均匀温度、成分,脱气去夹杂	钢包、中间包	●●●	●●●	●●●	夹杂颗粒越大,去除效率越高	设备简单,操作方便	强烈的搅拌,可能从顶渣中卷入渣滴和冲刷炉衬。
电磁净化	均匀温度、成分,去夹杂	钢包、中间包、连铸	●●●	●●●	●●	夹杂物不论颗粒大小,都能快速排除	设备复杂,操作灵活	钢渣界面的搅动强度不够大,不能提供夹杂物上浮的气泡。
渣洗	脱硫、脱氧和去夹杂	钢包、中间包、连铸			●●●	吸附上浮至钢渣界面的夹杂物颗粒	投资少,操作方便	为了保证效果,需要搅拌强化。
过滤器	去夹杂,优化钢液流场	中间包	●	●●	●●●	能去除细小夹杂物	难以满足钢水连续过滤要求	成本高,制作工艺较复杂。

注:●●●强,●●一般,●较弱

4 结论

(1)采用气体搅拌时,设法向钢液吹入数量更多,尺寸更小的气泡,能有效减少夹杂物的数量,减小夹杂物的尺寸。加强钢渣界面的搅动,促进夹杂物分离,有利于提高电磁净化和渣洗去除夹杂的效率。

(2)气体搅拌设备简单、方便,能有效去除钢中

夹杂,但对细小夹杂物去除效率不高。而电磁搅拌和过滤器可以去除尺寸细小的夹杂,但成本较高。生产中应根据工艺设备的情况,选择最经济,最实用的夹杂物去除技术,满足钢种性能要求。

(3)在冶炼、精炼及连铸过程中,将各种夹杂物去除技术进行合理组合,最有效地发挥各自的优势,实现多功能精炼,将会取得更好的效果。

参考文献

- 陈家祥. 钢铁冶金学(炼钢部分). 北京:冶金工业出版社,1999
- Shoji Taniguchi, Atsushi Kikuchi, Tomoko Ise. Model Experiment on the Coagulation of Inclusion Particles in Liquid Steel. ISIJ International, 1996, 36(Supplement): 117
- 国际钢铁协会编. 洁净钢-洁净钢生产工艺技术. 中国金属学会译. 北京:冶金工业出版社,2006
- Zheng Xiaofeng, Hayes Peter, Lee Hae-Geon. Particle Removal From Liquid Phase Using Fine Gas Bubbles. ISIJ, 1997, 37(11): 1091
- Wang Laihua, Lee Hae-Geon, Hayes Peter. Prediction of the Optimum Bubble Size for Inclusion Removal From Molten Steel by Flotation. ISIJ, 1996, 36(1): 7
- Wang Laihua, Lee Hae-Geon, Hayes Peter. A New Approach to Molten Steel Refining Using Fine Gas Bubbles. ISIJ, 1996, 36(1): 17
- 张明华. 中间包采用气体净化除去钢中夹杂物的探讨. 炼钢, 2005, 21(3): 30
- 王进, 孙维, 刘玉兰. 中间包钢水过滤净化技术. 华东冶金学院学报, 2000, 17(4): 288
- 陶立群, 姜茂发, 王德永, 等. 连铸中间包底吹氩物理模拟和工业实践. 钢铁, 2006, 41(5): 32
- Matsuno H, Kikuchi Y, Komatsu M, et al. Development of a New Deoxidation Technique for RH Degassers. Iron and Steelmaker, 1993, 20(7): 35
- 高海潮, 颜根发. 钢包电磁搅拌生产洁净钢的几个工艺理论问题. 钢铁研究, 2000(3): 14
- Miki Y, Kitaoka H, Bessho N. Inclusion Separation From Molten Steel in Tundish with Rotating Electromagnetic Field. Tetsu-to-Hagane, 1996, 82(6): 498
- Nakanishi K. Japanese State of the Art Continuous Casting Process. ISIJ, 1996, 36(Supplement): 14
- 王军. 连铸工艺中的电磁技术. 宽厚板, 2000, 6(3): 1821
- 战东平, 宋景欣, 姜周华, 等. 连铸结晶器电磁制动的使用效果分析. 中国冶金, 2006(5): 23
- 徐曾啓. 炉外精炼. 北京:冶金工业出版社, 1998
- 丁永昌. 钢和合金的特种熔炼. 武汉:中国地质大学出版社, 1989
- 潘秀兰, 王艳红, 梁慧智. 国内外电渣重熔技术的发展与展望. 鞍钢技术, 2005(2): 5
- Xintian L, Weiming J. Flow Behaviour and Filtration of Steel Melt in Continuous Casting Tundish. Ironmaking and Steelmaking, 1992, 19: 221
- Gairing R W, Cummings M. Operating Experience Using Inclusion Filtration Technology for Continuously Cast Steels. Iron & Steelmaker, 1993, 20(3): 55
- 李扬洲, 张大德, 赵克文, 等. 高速板坯连铸的钢水净化技术及效果. 钢铁, 2000, 35(8): 21
- 卢艳青, 张崇民, 戴云朵, 等. 中间包 CaO 质陶瓷过滤器滤除夹杂效果的研究. 冶金能源, 2003, 22(6): 9

幸伟(1979-),男,博士生,洁净钢冶炼研究。

收稿日期:2008-09-08