

采用 LF(-RH)精炼工艺生产铝脱氧钢钢液可浇性提升与取消钙处理工艺的试验研究

姜敏^{1*}, 王新华^{1,3}, 王郢², 王昆鹏², 高福彬^{1,3}, 张涛³

北京科技大学, 北京 100083; 2. 中天钢铁集团, 常州 213011; 3. 邯郸钢铁集团公司, 邯郸 056003

Investigation on Improving the Castability and Canceling the Ca Treatment for Aluminum Killed Steels Produced through LF(-RH) Refining Process

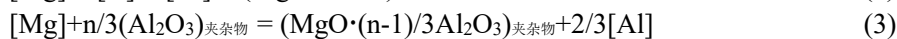
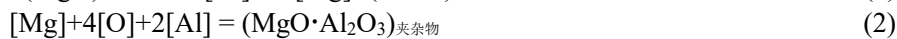
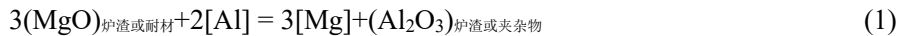
Jiang Min^{1*} Wang Xinhua^{1,3} Wang Ying² Wang Kunpeng² Gao Fubin^{1,3} Zhang Tao³

1. University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China; 2. Zennith Steel Co. Ltd., Changzhou, 213011, China; 3. Handan Iron and Steel Group Co. Ltd., Handan, 056003, China

1. 前言

铝脱氧钢包括超低碳、低碳、中碳、低合金、高强系列的热轧或冷轧带钢、中厚板以及轴承、齿轮等特殊钢棒线材, 其中超低碳钢必须采用 RH 或 VD 炉外精炼工艺, 部分钢企生产低碳铝脱氧钢采用 CAS-OB、RH 炉外精炼工艺, 部分钢企采用 LF 炉外精炼工艺。对于中厚板和轴承、齿轮等特殊钢棒线材产品, 绝大多数钢企采用 LF 或 LF-RH 炉外精炼工艺。

铝脱氧钢 LF 精炼通常采用高碱度和低 Fe₂O₃ 含量渣系, 以获得良好脱硫、脱氧和非金属夹杂物控制效果。但是, 由于炉渣碱度高、氧势低, 精炼过程会发生 (1) - (3) 式所示化学反应, 生成对钢液可浇性非常有害的镁尖晶石类夹杂物, 致使大部分钢种精炼后必须进行钙处理, 而钙处理除增加生产时间和成本之外, 由于钢液温度下钙的蒸汽压高, 还会生成大量浓烈白烟, 严重污染厂区环境。



为了解决采用 LF(-RH)炉外精炼工艺生产铝脱氧钢的钢液可浇性差问题, 北京科技大学、中天特钢、邯钢开展了合作科研, 包括钢液-精炼渣-耐材-非金属夹杂物间作用的实验室研究和新工艺方法的工业试验研究, 显著提升了 LF(-RH)工艺生产铝脱氧钢钢液的可浇性, 实现了轴承钢等特殊钢棒线材取消钙处理, SPHC 等低碳铝脱氧钢大部取消钙处理工艺的科研目标。

2. 铝脱氧钢 LF(-RH)炉外精炼过程非金属夹杂物变化

北京科技大学与某钢企合作对低碳铝脱氧钢 DC01 钢 LF 精炼过程钢液夹杂物的行为进行了研究, 该厂生产 DC01 钢采用铁水脱硫预处理-转炉冶炼-LF 精炼-钙处理-薄板坯连铸工艺, 在转炉出钢时向钢包内加入脱氧剂 Al、Mn 铁合金和石灰等精炼渣料, LF 精炼开始后加入剩余部分合金、铝和渣料, 并向渣中加入足量铝粒进行扩散脱氧, LF 精炼时间在 50 min 左右。

图 1 为生产 DC01 钢在 LF 精炼开始 (进站)、精炼 30min 和精炼结束时提取的钢水试样中夹杂物的组成在 CaO-MgO-Al₂O₃, 其中红色矩形符号表示夹杂物平均组成。可以看到, LF 精炼开始时夹杂物主要为铝脱氧产物 Al₂O₃, 精炼开始后夹杂物向 MgO-Al₂O₃ 系夹杂物变化, LF 精炼结束时夹杂物绝大多数为 MgO-Al₂O₃ 系夹杂物, 或含少量 CaO 的 MgO-Al₂O₃(-CaO)系夹杂物。如不进行钙处理, 连铸过程 MgO-Al₂O₃ 系夹杂物极易在塞棒棒头部位粘接、堆积 (操作人员称其为“长棒”), 严重影响连铸顺行甚至造成断浇。

图 2 为国内某特钢厂生产 GCr15 轴承钢在 LF 精炼、RH 精炼和连铸过程提取的钢水试样中夹杂物的组成在 CaO-MgO-Al₂O₃ 系的分布，图中红色曲线所围区域为熔点低于 1600°C 成分区域。该钢企生产轴承钢采用 EAF-LF-RH-CC 工艺，在电弧炉出钢过程向钢包内加入大部分的脱氧剂 Al、合金和精炼渣料，LF 精炼后加入剩余合金、铝和渣料，并向渣中加入足量铝粒进行扩散脱氧。LF 精炼时间在 110 min 左右，RH 精炼时间在 33min 左右，根据轴承钢生产工艺要求，精炼后不对钢液进行钙处理。

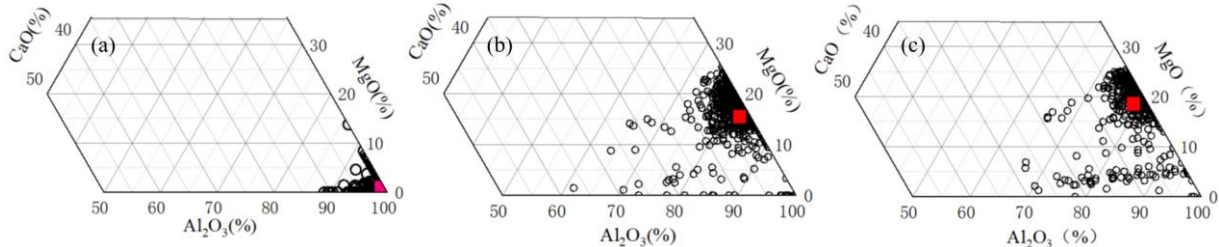


图 1 DC01 钢 LF 精炼 (a) 进站，(b) 精炼 30min 和 (c) 精炼结束时钢水试样中夹杂物组成在 CaO-MgO-Al₂O₃ 系分布
Fig.1 Composition distribution of the inclusions in CaO-MgO-Al₂O₃ system of the DC01 steel samples taken at (a) start, (b) 30min and (c) end of LF refining

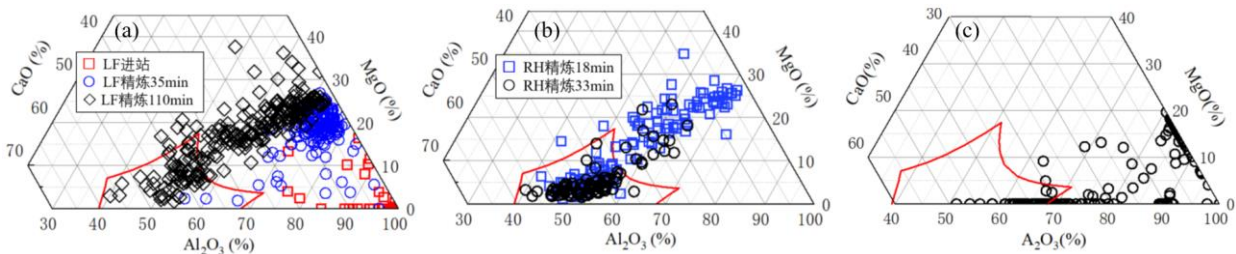


图 2 轴承钢 (a) LF 精炼，(b) RH 精炼，(c) 连铸中间包钢水试样中夹杂物的组成在 CaO-MgO-Al₂O₃ 系的分布
Fig.2 Composition distribution of the inclusions in CaO-MgO-Al₂O₃ system of the bearing steel samples taken at (a) LF refining, (b) RH refining and (c) in CC tundish

由图 2 可以看到，LF 精炼开始时轴承钢中的夹杂物主要为 Al₂O₃，精炼开始后向 MgO-Al₂O₃ 系转变，至精炼 35min 时已近乎全部转变为主要组成为 MgO 和 Al₂O₃ 的 MgO-Al₂O₃-CaO 系夹杂物，但 CaO 含量多于同精炼时段的 DC01 低碳铝脱氧钢，这主要是因为轴承钢含 0.2% 左右 Si，加入的硅铁合金带入少量钙与钢液中 MgO-Al₂O₃ 系夹杂物发生反应所致。在采用 LF 精炼工艺生产的各类铝脱氧钢中，DC01、SPHC 类低碳铝脱氧钢的可浇性最差，这与其受规定成分所限不能加入硅铁合金有重要关系。

随着 LF 精炼进一步进行，轴承钢中夹杂物向增加 CaO 含量的方向继续转变，其原因是炉渣中部分 CaO 被钢液中 [Al] 所还原，生成 [Ca] 并与钢液中 MgO-Al₂O₃-CaO 系夹杂物发生反应，使夹杂物 CaO 含量增多，MgO 或 Al₂O₃ 含量减少。如图 2 (a) 所示，经过 110min 的 LF 精炼，MgO-Al₂O₃-CaO 系夹杂物中近 30% 已转变为熔点低于 1600°C 的液态夹杂物。

由图 2 还可以看到，RH 精炼过程 MgO-Al₂O₃-CaO 系夹杂物的 MgO 和 Al₂O₃ 含量进一步减少，CaO 含量增加，在 RH 精炼 18min 时，钢中 46.5% 左右的夹杂物为熔点低于 1600°C 的液态夹杂物，而在 RH 精炼结束钢水试样中，检测到的夹杂物 95% 以上为液态夹杂物。

图 2 (c) 为轴承钢连铸中间包钢水试样中夹杂物的组成分布，可以看到，尽管 RH 精炼结束时夹杂物已近乎全部为液态 CaO-MgO-Al₂O₃ 系夹杂物，但中间包钢水中又有相当数量 MgO-Al₂O₃ 系夹杂物生成，这主要是因为连铸过程钢液仍与包衬耐材和炉渣发生 (1) - (3) 式反应，且由于连铸过程钢包内钢水流动混合弱，生成的 MgO-Al₂O₃ 系夹杂物难以如 RH 精炼过程被大量去除所致。由于 MgO-Al₂O₃ 系夹杂物对钢液可浇性影响很大，该试验浇铸至第 3 炉时即由于塞棒“长棒”而停浇。

3. 耐材和精炼渣碱度对生成 MgO-Al₂O₃ 系夹杂物的影响

如(1)-(3)式所示, $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂物生成首先是因为 $[\text{Al}]$ 将耐材或炉渣中 MgO 还原, 生成 $[\text{Mg}]$ 并参与脱氧或与钢液中 Al_2O_3 夹杂物反应所致。为了更好地把握耐材和精炼渣对生成 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂物的影响, 作者开展了相关实验室研究, 在感应炉 Ar 气氛下, 分别采用 Al_2O_3 质和 MgO 质坩埚, 熔化配制 1kg 高铁车轴钢成分钢液, 在 1600°C 温度下加入铝和不同碱度配比的 50g 熔剂对钢液进行脱氧和精炼, 反应 25min 后结束试验。

图 3 为采用 MgO 质坩埚精炼 25min 后钢水试样中夹杂物的组成在 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 系中的分布, 可以看到, 夹杂物中存在许多 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 系或含少量 CaO 的 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 系夹杂物。尤其值得关注的是, 在采用 MgO 质坩埚情况下, 即便没有顶渣, 反应 25min 后钢液中夹杂物也主要为 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂物。而在采用 Al_2O_3 质坩埚、炉渣碱度为 4.5 的实验中, 即便渣中含 5% 左右 MgO , 反应 25min 后, 钢液中夹杂物也主要为 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂物。

4. 提高铝脱氧钢可浇性和取消钙处理工艺的工业试验

北京科技大学分别与中天特钢公司和邯郸钢铁公司合作, 对采用 LF(-RH) 炉外精炼工艺生产的 GCr15 轴承钢和 SPHC 低碳铝脱氧钢开展了取消钙处理工艺的工业试验研究。

GCr15 轴承钢工业试验在中天特钢公司进行, 试验中钢水包渣线部位仍采用 MgO-C 质耐材, 其余部位更换为 Al_2O_3 质耐材, 中间包衬则全部采用 Al_2O_3 质耐材, 连铸采用 $320\text{mm}\times 280\text{mm}$ 方坯铸机, 不对钢水进行钙处理。

工业试验结果证实, 钢包和中间包包衬改用 Al_2O_3 质耐材对抑制镁尖晶石类夹杂物的生成十分有效, 对中间包钢水试样夹杂物采用 ASPEX 自动分析结果证实, 纯尖晶石类夹杂 (Spinel pure) 和富尖晶石类夹杂 (Spinel rich) 数量之和由 185 个/ 100mm^2 大幅减少至 24.3 个/ 100mm^2 。在整浇次 8 炉连浇整个过程, 塞棒棒位平稳, 没有发生“长棒”, 连铸结束后塞棒棒头和浸入式水口内壁表面光滑, 基本没有“结瘤”发生。

对 SPHC 低碳铝脱氧钢的工业试验在邯钢邯宝炼钢厂进行, 试验中钢水包渣线部位包衬仍采用 MgO-C 质耐材, 其余部位改用 Al_2O_3 质耐材。由于中间包包衬仍采用 MgO-C 质耐材, 加之该钢种取消钙处理后浇铸难度最大, 试验中采取了“3+1”工艺控制策略, 即连续三炉钢水不进行钙处理后, 对其后一炉钢水进行钙处理, 再连续三炉不进行钙处理, 其后一炉进行钙处理, 以此模式循环完成整浇次浇铸 (15 炉左右)。

图 4 为生产 SPHC 钢采用 Al_2O_3 质钢包包衬后连铸过程塞棒棒位变化情况, 可以看到, 对浇次第 2 炉进行了钙处理, 其后 3 炉不进行钙处理, 塞棒棒位总计提升 12mm, 接着浇铸一炉钙处理钢水, 即可将之前三炉镁尖晶石夹杂在塞棒棒头的粘接、堆积“化掉”, 再连续浇铸 3 炉未钙处理钢水, 塞棒棒位再增加 12mm 左右, 然后浇铸一炉钙处理钢水将其“化掉”, 直至浇次顺利结束。

5. 结论

(1) 对铝脱氧钢采用 LF(-RH) 炉外精炼工艺, 钢液中 $[\text{Al}]$ 会与包衬耐材或精炼渣中 MgO 反应, 生

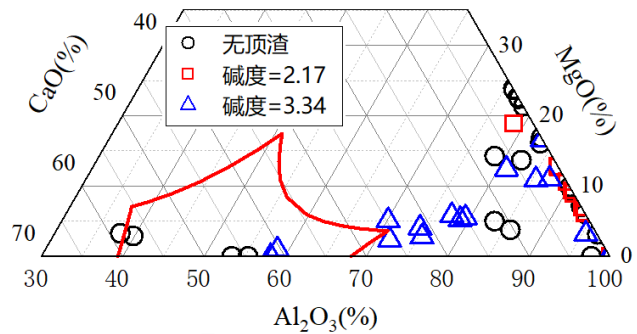


图 3 采用 MgO 质坩埚不同顶渣碱度条件下钢液夹杂物组成在 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 系中分布

Fig.3 Composition distribution of the inclusions in $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ system reacting with the slag of different basicity using MgO crucibles

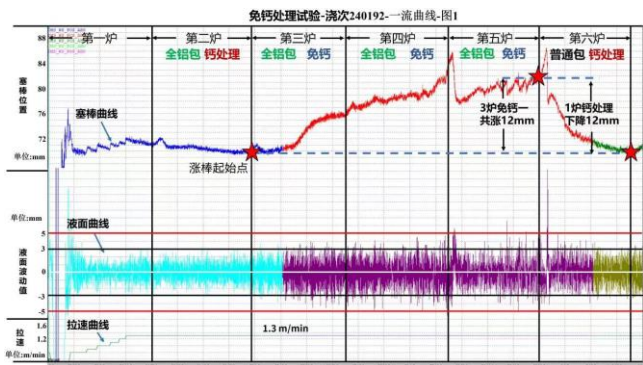


图 4 SPHC 钢连铸过程中间包塞棒棒位变化

Fig.4 TD stopper position change in continuous casting of SPHC steel

成对钢液可浇性非常有害的镁尖晶石类夹杂物，其中尤以 SPHC、DC01 类低碳铝脱氧钢的问题最大。

（2） 实验室研究结果表明，采用 MgO 质坩埚，即便没有顶渣，反应 25min 后钢液中夹杂物也主要为镁尖晶石类夹杂物；采用 Al₂O₃ 质坩埚，即便顶渣含 5%左右 MgO，在顶渣碱度 2.4-4.5 范围，钢液中夹杂物也主要为 CaO-Al₂O₃ 系夹杂物；

（3） 开展了提升 GCr15 轴承钢和 SPHC 低碳铝脱氧钢钢液可浇性试验，其中轴承钢工业试验采用了 Al₂O₃ 质钢包和中间包包衬，完全取消了钙处理工艺；低碳铝脱氧钢工业试验采用了 Al₂O₃ 质钢包包衬，实现了“3+1”工艺模式，即连续三炉不进行钙处理，对后一炉钢水进行钙处理，再连续三炉不进行钙处理，以此循环完成整浇次浇铸。