

RH不加钙处理对SCM435冷镦钢D类和Ds类夹杂物的影响

李永超^{1,2} 吕皓杰^{1,2} 李刚^{1,2} 李龙^{1,2}

(1 邢台钢铁有限责任公司技术中心, 邢台 054027; 2 河北省线材工程技术创新中心, 邢台 054027)

摘要 SCM435钢的生产流程为80 t BOF-LF-RH-280 mm × 325 mm 坯连铸。LF 终点精炼渣成分为(%) : 45 ~ 55CaO, 10 ~ 15SiO₂, 20 ~ 30Al₂O₃, $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 1\%$ 。分析了RH加钙(0.0013% Ca)和RH不加钙(0.0002% Ca)对 $\Phi 13$ mm 盘条中D和Ds夹杂物的影响。结果表明,RH不加钙处理工艺夹杂物最大尺寸为7.65 μm , Ds ≤ 0.5 级合格率为100%;RH加钙处理工艺夹杂物最大尺寸为25.68 μm , Ds ≤ 0.5 级合格率为95%。在数量控制方面,RH不加钙处理工艺夹杂物指数由RH加钙工艺的0.72降至0.68,D类 ≤ 1.0 合格率由RH加钙工艺的30%提高至75%;RH不加钙处理工艺夹杂物主要为MgO · Al₂O₃,少量钙铝酸盐夹杂,RH加钙工艺为镁铝尖晶石、钙铝酸盐和CaS多相夹杂。因此,在脆性D类和Ds类夹杂物尺寸、数量和类型控制上,RH不加钙处理工艺改善效果明显。

关键词 SCM435 冷镦钢 夹杂物 不加钙处理工艺

Effect of RH Non-adding Ca Treatment on D and Ds Inclusion of SCM435 Cold Heading Steel

Li Yongchao^{1,2}, Lü Haojie^{1,2}, Li Gang^{1,2} and Li Long^{1,2}

(1 Technical Center, Xingtai Iron and Steel Co Ltd, Xingtai 054027;

2 Hebei Engineering Innovation Center for Wire Rod, Xingtai 054027)

Abstract The production flow sheet of SCM435 steel is 80 t BOF-LF-RH-280 mm × 325 mm bloom casting. LF end refining slag composition is (%) : 45 ~ 55 CaO, 10 ~ 15 SiO₂, 20 ~ 30 Al₂O₃, $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 1\%$. The effect of RH adding calcium (0.0013% Ca) and RH non-adding calcium (0.0002% Ca) on D and Ds inclusion in $\Phi 13$ mm coil is analyzed. The results show that, the inclusion maximum size in steel with RH non-adding calcium treatment process is 7.65 μm , the pass rate of Ds ≤ 0.5 is 100%, and that with the RH adding calcium treatment process is 25.68 μm , and the pass rate of Ds ≤ 0.5 is 95%. The inclusion index of non-adding calcium treatment process decreases from original RH adding calcium process 0.72 to 0.68 and pass rate of D ≤ 1.0 increases from original RH adding calcium process 30% to 75%. With non-adding calcium treatment process the inclusions are mainly MgO · Al₂O₃ and a small amount of Calcium aluminate, and with RH adding calcium process the inclusions are magnesium-alumina spinel, calcium aluminate and CaS heterogeneous inclusions. Therefore, in terms of size, quantity and type control of inclusions of brittle D and Ds, the improvement of RH non-adding Calcium treatment is obvious.

Material Index SCM435, Cold Heading Steel, Inclusion, RH Non-adding Calcium Treatment Process

SCM435钢属于典型的中碳铬钼冷镦钢,主要用于生产汽车用10.9级、12.9级高强度级别螺栓,要求其具有较高的淬透性、良好的抗冲击韧性和较高的抗疲劳强度^[1]。而钢中非金属夹杂物,尤其是硬脆相的D类和Ds类氧化物夹杂,直接影响高强度钢疲劳寿命的提高^[2]。大量研究表明^[3-4],钢中D类和Ds类夹杂物主要为CaO-Al₂O₃或CaO-MgO-Al₂O₃,这类夹杂物不易上浮去除,形成原因主要是采用了钙处理工艺,以便将Al₂O₃等高熔点夹杂变性为含Ca量较高的低熔点钙铝酸盐类复合夹杂物,防止水口结瘤。因此,取消钢水钙处理可从根本上控制此类夹杂物的产生。本文重点研究了RH不加钙处理工艺对SCM435钢盘条中D类和Ds类夹

杂物尺寸、数量和类型的影响。

1 试验钢种及工艺流程

试验钢种为汽车用特殊钢SCM435,生产流程为:(高炉铁水+废钢)→80 t 转炉→80 t LF+80 t RH 双精炼→大方坯连铸(325 mm × 280 mm)→钢坯检验→大方坯加热→开坯→检验→修磨→步进梁式加热炉加热→高压水除鳞→高线轧制。

试验炉次和正常炉次均为转炉采用高拉碳出钢,终点碳控制在0.08%~0.12%,出钢使用滑板挡渣;出钢过程一次性加入铝块进行强脱氧;LF精炼通电5 min后开始造白渣,要求10 min内快速造渣,保证白渣精炼时间 ≥ 15 min,精炼后炉渣目标成

表 1 RH 不加钙处理和 RH 加钙处理的 SCM435 钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of SCM435 steel with RH non-adding Ca treatment and RH adding Ca treatment/%

| RH 工艺 | C | Si | Mn | S | P | Cr | Mo | Al | Ca | T. O |
|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|---------|---------|
| 不加钙处理 | 0.36 | 0.17 | 0.65 | 0.004 | 0.015 | 0.97 | 0.20 | 0.030 | 0.000 2 | 0.000 9 |
| 加钙处理 | 0.35 | 0.18 | 0.63 | 0.006 | 0.016 | 0.96 | 0.20 | 0.029 | 0.001 3 | 0.001 0 |

分(/%)为 45~55 CaO, 10~15 SiO₂, 20~30 Al₂O₃, Σ(FeO + MnO) ≤ 1.0, 碱度 R 控制在 3~6; RH 真空度 ≤ 100 Pa, 纯脱气时间 ≥ 20min, 底吹氩气量 80~100 L/min, 软吹时间 ≥ 15 min。连铸采取全程保护浇注, 过热度控制在 15~30℃, 结晶器液面波动控制在 ± 3 mm。

唯一的区别是试验炉次 RH 工序不进行钙处理, 正常炉次在破空后喂入 ≤ 100m 纯钙线。同时, 要求与正常炉次轧制成相同规格盘条(实际为 Φ13 mm), 分别采用 FEI explorer4 非金属夹杂物自动扫描电镜法(扫描面积定为 300 mm², 扫描步长定为 3 μm)和 GB/T10561-2005 国标法对轧材试样纵剖面非金属夹杂物的尺寸、数量和类型进行对比分析和评价。

表 1 为正常加钙处理工艺和 不加钙处理工艺化学成分对比, 从表 1 中可以看出, 两种处理工艺除 Ca 成分相差较大外, 其余成分基本相同。

2 非金属夹杂物的检测与分析

2.1 不加钙处理工艺对非金属夹杂物尺寸的影响

从 1(a) 和表 2 中可以看出, RH 不加钙处理工艺扫描出非金属夹杂物 204 个, 夹杂物尺寸均在 8 μm 以下, 未发现大尺寸 D_s 类夹杂; 加钙处理工艺扫描出非金属夹杂物 215 个, 8 μm 以下占比 95%, 8~13 μm 有 9 个, 存在个别大尺寸 D_s 类夹杂, 最大

为 25.68 μm。通常高端汽车用冷镦钢要求夹杂物最大尺寸控制在 20 μm 以下, 而加钙处理工艺仍存在超标的大尺寸夹杂。因此, 不加钙处理工艺在夹杂物尺寸控制上优势明显。

RH 不加钙处理工艺控制大尺寸夹杂物的优势主要有两方面: 一方面 RH 不加钙处理工艺减少了钢水中 Ca 的来源, 避免了大尺寸复合多相夹杂物的形成; 另一方面经过 RH 钙处理后的非金属夹杂物为镁铝尖晶石和钙铝酸盐类复合夹杂, 不易上浮去除。研究表明^[5], 液态的 12CaO·7Al₂O₃ 夹杂物上浮去除最慢, 而 Al₂O₃ 或 MgO·Al₂O₃ 上浮去除较快, 这与钢液的接触角大小有关。液态的 12CaO·7Al₂O₃ 夹杂物与钢液的接触角最小, 低于 90°, 渣相和夹杂物之间的钢液薄膜不易破裂, 夹杂物很难穿过渣膜进入钢渣。而 Al₂O₃ 与钢液的接触角分别为 144° 和 134.1°, 接触角较大, 容易在软吹和钢水镇静过程中上浮去除。

2.2 不加钙处理工艺对非金属夹杂物数量的影响

从图 1(b) 中可以看出, 在扫描面积基本相同的情况下, 不加钙处理工艺夹杂物数量为 204 个, 加钙处理工艺的为 215 个, 比正常工艺减少了 5.1%; 从非金属夹杂物指数上看, 不加钙处理工艺单位面积上夹杂物数量为 0.68, 钙处理工艺为 0.72, 降低了 5.6%。同时, 不加钙处理工艺夹杂物尺寸大于 8 μm 的数量为 0, 而加钙工艺存在 2 个大尺寸 D_s 类夹杂。因此, 不加钙处理工艺在降低夹杂物数量方面有一定改善效果, 主要原因同夹杂物尺寸控制原因相似, 不加钙处理工艺有利于降低钢中 Ca 含量和促进 Al₂O₃ 及 MgO·Al₂O₃ 上浮去除。

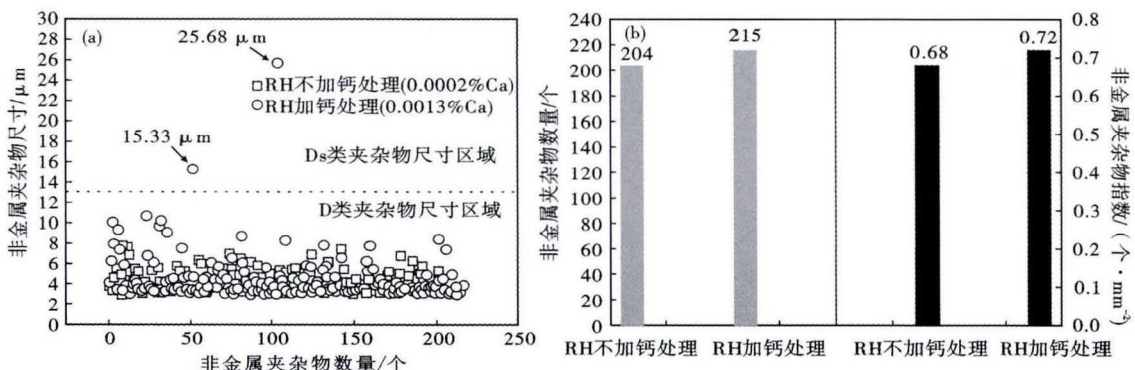


图 1 RH 不加钙处理(0.000 2% Ca)和 RH 加钙处理(0.001 3% Ca)SCM435 钢 Φ13 mm 盘条非金属夹杂物尺寸(a)和数量(b)
Fig. 1 Size (a) and number (b) of nonmetallic inclusions in Φ13 mm coil of SCM435 steel with RH non-adding Ca treatment (0.000 2% Ca) and RH adding Ca treatment (0.001 3% Ca)

表 2 RH 不加钙处理(0.000 2%Ca)和 RH 加钙处理(0.001 3%Ca)的 SCM435 钢 Φ13 mm 盘条中夹杂物扫描电镜检测结果

Table 2 SEM examination results of inclusions in Φ13 mm coil of SCM435 steel with RH non-adding Ca treatment (0.000 2%Ca) and RH adding Ca treatment (0.001 3%Ca)

| 工艺 | 检测面积/mm ² | 检测总数/个 | 夹杂物指数/(个·mm ⁻²) | 不同尺寸的夹杂物个数 | | | d _{max} /μm |
|----------|----------------------|--------|-----------------------------|--------------|---------------|-----------|----------------------|
| | | | | d = 3 ~ 8 μm | d = 8 ~ 13 μm | d ≥ 13 μm | |
| RH 不加钙处理 | 298 | 204 | 0.68 | 204 | 0 | 0 | 7.65 |
| RH 加钙处理 | 297 | 215 | 0.72 | 205 | 8 | 2 | 25.68 |

注:夹杂物指数 = 夹杂物总个数/检测总面积

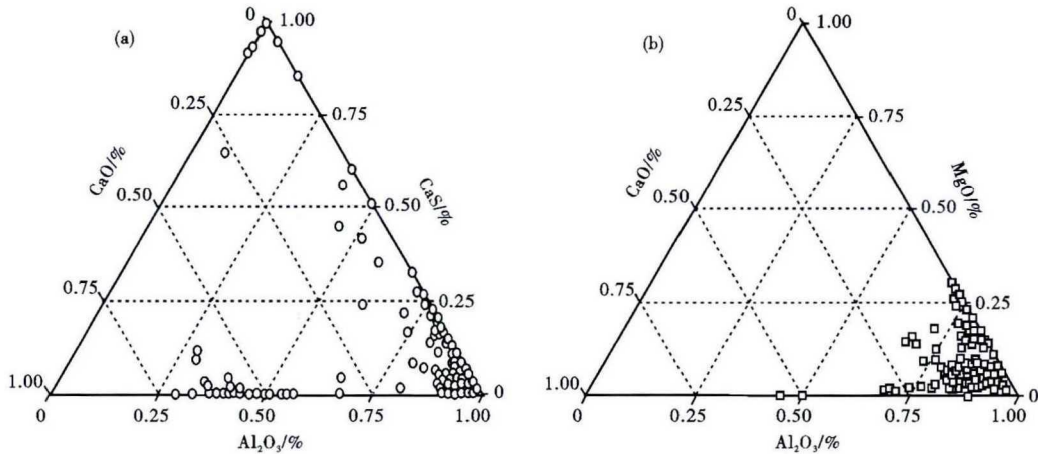


图 2 RH 加钙处理(0.001 3%Ca) (a) 和 RH 不加钙处理(0.000 2%Ca) (b) 钢中夹杂物的三元相图

Fig. 2 Ternary phase diagram of inclusions in steel with RH adding Ca treatment (0.001 3%Ca) (a) and RH non-adding Ca treatment (0.000 2%Ca) (b)

2.3 不加钙处理工艺对非金属夹杂物类型的影响

RH 加钙处理工艺的盘条夹杂物主要为镁铝尖晶石和钙铝酸盐的两相复合夹杂,部分还存在镁铝尖晶石、钙铝酸盐和 CaS 的三相复合夹杂[见图 2

和图 3(a)]。由文献[6]可知,加钙处理前后非金属夹杂的演变规律,由于加钙工艺进行了钙处理,成品 Ca 为 13×10^{-6} 。钢中大量 Al_2O_3 和镁铝尖晶石被变性为钙铝酸盐夹杂,夹杂物中 CaO 组分占比较

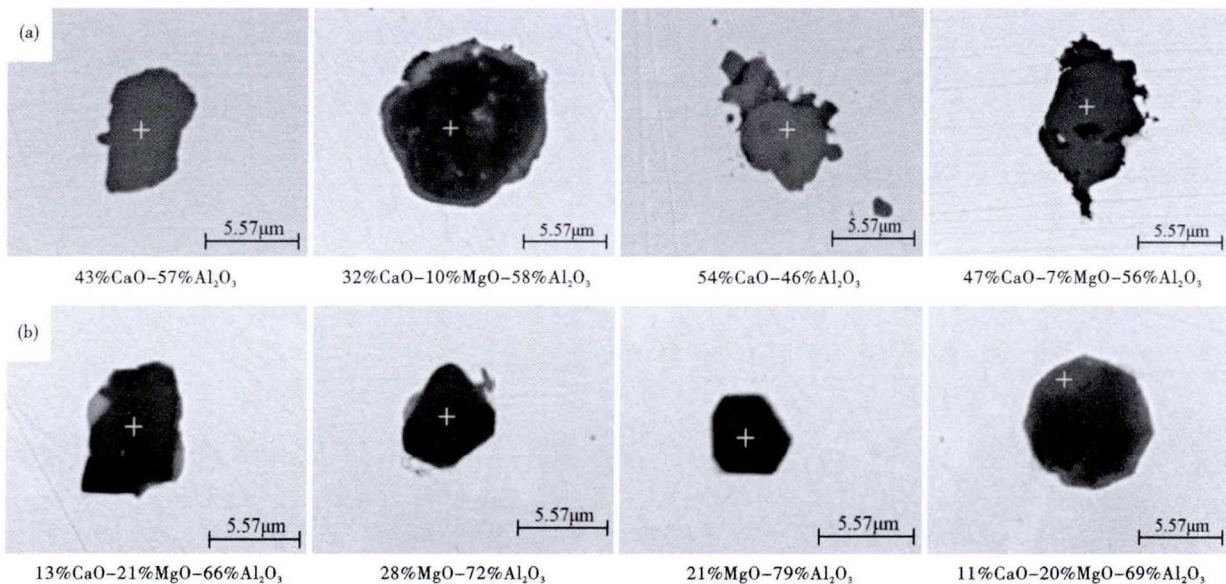


图 3 加钙处理(a)和不加钙(b)处理工艺钢中夹杂物形貌及组分

Fig. 3 Morphology and components of inclusions in steel with adding Ca (a) and non-adding Ca (b) treatment process

高。同时, Ca 与 S 的结合能力也非常强, 钢水中富余的 Ca 除形成 CaO 外, 还有富余的 Ca 与 S 结合形成 CaS。由于钙铝酸盐夹杂具有较大的 S 容量, 使得足够的 CaS 在钙铝酸盐夹杂周围析出, 形成更大尺寸的复合型多相夹杂。

RH 不加钙处理工艺的盘条夹杂物类型相对比较单一, 主要为镁铝尖晶石夹杂, 少量钙铝酸盐夹杂 [见图 2 和图 3 (b)]。由于钢水不加钙处理, 钢中 Ca 含量仅有 0.000 2%, 切断了钢中夹杂物中 Ca 的主要来源, CaO 组分占比基本上控制在 25% 以内, 钢中的镁铝尖晶石夹杂和钙铝酸盐夹杂主要是通过钢渣反应形成。同时, 钢中 Ca 含量低也避免了高熔点 CaS 的形成。

2.4 不加钙处理工艺对非金属夹杂物评级的影响

分别取加钙处理工艺和不加钙处理工艺对应的盘条各 10 卷, 每卷头尾各取 1 根, 共计 20 根样品。按照 GB/T10561-2015 进行夹杂物评级, 检测面积达到 4000 mm², 进一步评价不加钙处理工艺对非金属夹杂物的影响。

结果表明, 不加钙处理工艺 D 类 ($D_{\text{细}} + D_{\text{粗}}$) ≤ 1.0 合格率为 75%, 其中 $D_{\text{细}} \leq 1.0$ 级合格率达到 95%, 仅有 1 根为 $D_{\text{细}} 1.5$ 级; 加钙处理工艺 D 类 ($D_{\text{细}} + D_{\text{粗}}$) ≤ 1.0 合格率仅 30%, 其实 $D_{\text{细}} \leq 1.0$ 级合格率为 55%, 有 9 根 $D_{\text{细}}$ 达到了 1.5 级, 而 D 类夹杂物代表了球状氧化夹杂物的数量, 因此不加钙处理工艺在夹杂物数量控制上有明显改善效果。

Ds 类大尺寸夹杂物控制方面, 不加钙处理工艺未发现 Ds 类夹杂, 合格率 100%; 加钙处理工艺 Ds ≤ 0.5 级合格率为 95%, 其中有 4 根为 Ds 0.5 级 (尺寸为 13 ~ 19 μm), 1 根达到 1.0 级 (尺寸为 19 ~ 27 μm)。

因此, 不论在夹杂物数量控制方面 (D 类评级) 还是在夹杂物尺寸控制方面 (Ds 类评级), RH 不加

钙处理工艺均有明显改善效果。

3 结论

(1) RH 不加钙处理工艺夹杂物最大尺寸为 7.65 μm , 加钙处理工艺为 25.68 μm ; 同时不加钙处理工艺夹杂物指数由正常工艺的 0.72 降至 0.68; 在类型控制方面, 不加钙处理工艺夹杂物相对单一, 主要为 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, 少量钙铝酸盐夹杂, 加钙工艺为镁铝尖晶石、钙铝酸盐和 CaS 多相夹杂。

(2) 按照 GB/T10561-2015 国标评级法, 不加钙处理工艺 D 类 ($D_{\text{细}} + D_{\text{粗}}$) ≤ 1.0 合格率为 75%, 加钙处理工艺仅为 30%; Ds 类大尺寸夹杂物控制方面, 不加钙处理工艺未发现 Ds 类夹杂, 合格率 100%; 加钙处理工艺 Ds ≤ 0.5 级合格率为 95%。

(3) 对于 D 类和 Ds 类夹杂物, 不论在尺寸和数量控制方面, 还是优化夹杂物类型方面, 不加钙处理工艺均有明显改善效果。

参考文献

[1] 李恒坤, 张晓雪. 冷锻钢 SCM435 奥氏体连续冷却转变研究 [J]. 现代冶金, 2017, 45(6): 1-3.
 [2] 李守新, 翁宇庆, 惠卫军, 等. 高强度钢超高周疲劳性能 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 14-17.
 [3] 张广杰, 张 飞. 无钙处理条件下轴承钢水可浇性技术的研究与应用 [J]. 中国冶金, 2014, 4(5): 40-44.
 [4] 杨光维, 陈兆平, 柳向椿. 高等级齿轮钢夹杂物控制技术 [J]. 炼钢, 2019, 35(1): 61-65.
 [5] 张立峰. 钢中非金属夹杂物 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019: 79-80.
 [6] 赵东伟, 包燕平, 王 敏, 等. 钙处理对铝镇静钢中非金属夹杂物变性效果的影响 [J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(9): 1138-1143.

李永超 (1985-), 男, 硕士 (2012 年北京科技大学), 工程师, 2009 年河北理工大学 (本科) 毕业, 中低碳冷锻钢开发和工艺研究。E-mail: liyongchao1220@163.com

收稿日期: 2020-05-03

尊敬的投稿作者: 《特殊钢》现无网站投稿平台, 如发现有伪造特殊钢投稿网站欺骗作者, 请及时电话告知
 地址: 湖北省黄石市黄石大道 316 号、新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社
 邮编: 435001 电话: 0714-6297386 6297313 投稿邮箱: E-mail: tsghs@sina.com