

超低氧弹簧钢 60Si2Mn 的夹杂物研究

周红霞 王 郢 王新华

(北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘 要 通过 80 t LD-LF(VD)-CC 流程, 采用转炉出钢铝沉淀脱氧, 出钢后加铝粉强扩散脱氧工艺所生产的 60Si2Mn 弹簧钢铸坯总氧含量(T. O)为 10×10^{-6} , [S] 0.005%, [P] 0.010%。分析结果表明, LF 末期和 VD 末期钢水中的夹杂物主要为 CaO(MgO)-Al₂O₃-CaS-SiO₂ 系; 铸坯中的夹杂物主要为 CaO(MgO)-Al₂O₃-CaS-SiO₂-TiN 复合夹杂。因为连铸时保护浇铸不当, 使[N]增加, 促使铸坯含 TiN 夹杂。

关键词 超低氧弹簧钢 LD-LF(VD)-CC Al 脱氧 夹杂物

A Study on Inclusion in Ultra-low Oxygen Spring Steel 60Si2Mn

Zhou Hongxia, Wang Ying and Wang Xinhua

(Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract Spring steel 60Si2Mn produced by 80 t LD - LF(VD) - CC flow sheet using aluminum killing during tapping and aluminum powder strong diffusion deoxidation after tapping to get total oxygen content (T. O) in billet of steel 10×10^{-6} , [S] 0.005%, [P] 0.010%. Analysis results showed that the main inclusion in steel at end phase of LF and end phase of VD was CaO(MgO)-Al₂O₃-CaS-SiO₂ series, the main inclusion in billet was CaO(MgO)-Al₂O₃-CaS-SiO₂-TiN compound inclusion. As shielding practice was unsuitable led to increasing [N] and containing TiN inclusion in billet.

Material Index Ultra-low Oxygen Spring Steel, LD - LF(VD) - CC, Al Killing, Inclusion

目前弹簧钢等合金钢主要有以 Al 脱氧^[1-5]降低钢中总氧和采用 Si 脱氧, 控制钢中夹杂物种类、形貌、大小、分布^[6-8]这两种脱氧工艺。本文试验的 60Si2Mn 钢工艺路线为 LD-LF(VD)-CC, 采用 Al、Si、Mn 复合脱氧的脱氧制度, 并分析研究了钢中气体含量和夹杂物。

1 生产工艺及研究方法

80 t LD(氧气顶吹转炉)出钢采用 Al 强脱氧, 配合 SiMn 脱氧, 控制转炉终点钢水[C] 0.10% ~ 0.20%, 出钢后迅速造高碱度低氧化性渣, LF 钢水到站后预吹氩 5 min 及时调整氩气流量。

LF(表 1)精炼过程中分批向渣中加入铝粒、电石进行强扩散脱氧, 白渣形成后添加合金调整 C、Si、Mn 成分, 控制炉渣碱度 ≥ 4 , 渣中 (FeO + MnO) $\leq 1\%$ 。

表 1 LF 主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of LF

项目	参数
额定处理量/t	80
钢包直径/mm	2 400
自由空间/mm	1 000
变压器容量/MVA	14
升温速度/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)	4

VD(100 Pa) 20 min 后喂 CaSi 线, 软吹氩 ≥ 15 min 后进行浇铸成 200 mm \times 200 mm 的方坯。试验弹簧钢 60Si2Mn 基本成分为 (%): 0.59C、1.88Si、0.76Mn、0.010P、0.005S、0.03Als。

2 试验结果

2.1 精炼过程钢水及铸坯 T. O 和 [N] 分析

由图 1 实线可见, 试验的 3 炉钢在整个精炼过程中的钢水 T. O 稳定下降, 到精炼末期均达到 $10 \times$

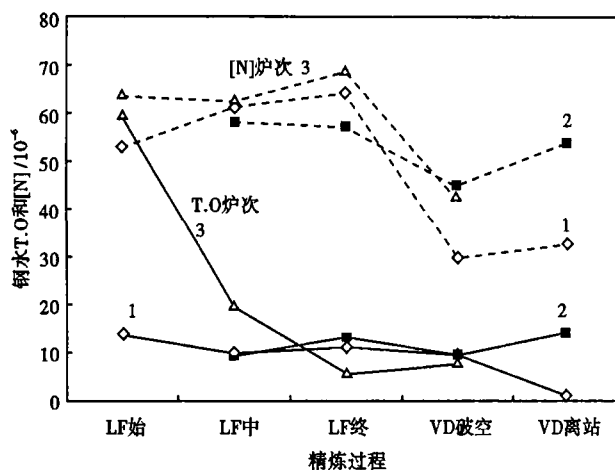


图 1 弹簧钢 60Si2Mn 精炼过程 T. O 和 N 含量的变化

Fig. 1 Change of T. O content and N content in spring steel 60Si2Mn during refining process

10^{-6} 左右。第 3 炉的 LF 到站钢水 T. O 高达 60×10^{-6} , 可能是由于取样操作不当导致分析的 T. O 结果远高于前两炉 (20×10^{-6})。第 1 炉钢在 VD 破空到 VD 离站钢水 T. O 有略微回升, 可能是由于 VD 破空后喂钙线对钢水进行钙处理的时候导致钢水剧烈翻腾所致, 第 2 炉钢在 VD 破空到 VD 离站的钢水 T. O 从 9×10^{-6} 升到 14×10^{-6} , 由于第 2 炉喂线后 T. Fe 回升较大, 从而导致炉渣氧化性高, 不利于脱氧, 再就是由于真空度 (250 Pa) 不够也对脱氧不利, 第 3 炉由于未测 VD 离站钢水 T. O 故不作比较。

图 1 虚线可见, 在 LF 过程中, 第 1、3 炉钢水的 [N] 均有所上升 (第 2 炉 LF 初期钢水 [N] 未测); 经过 VD 真空处理后大幅下降, 其中第 1 炉由于真空度 (60 Pa) 控制较好, 真空处理后, [N] 从 64×10^{-6} 降低到 30×10^{-6} , 降幅达 53%; 真空处理结束后由于钙处理导致钢水剧烈翻腾, 不可避免的发生了钢水吸氮现象, 使钢水 [N] 回升。

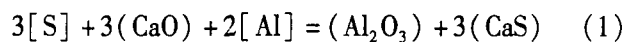
表 2 是 3 炉钢铸坯靠内弧 1/4 处、中心、靠外弧 1/4 处各取一块做 T. O 及 [N] 的平均值。由表 2 可见 3 炉钢的 T. O 比较稳定, 均在 10×10^{-6} 左右, 而且与精炼末期相比没有大的波动; 分析铸坯的 [N] 较浇铸前均有上升, 第 3 炉甚至高达 74×10^{-6} 。

表 2 铸坯 T. O 及 N 含量/ 10^{-6} Table 2 T. O and N content in cast billet / 10^{-6}

炉次	T. O	[N]
1	11	60
2	10	64
3	9	74

2.2 精炼过程钢中非金属夹杂物的变化

3 炉钢在 LF 末期钢水中的夹杂物主要是 CaO (MgO)- Al_2O_3 -CaS-SiO₂ 系夹杂, 由于含 SiO₂ 的夹杂物很少, 且 SiO₂ 的含量极少, 为了分析方便, 图 2 (a) 中只画出了 CaO (MgO)- Al_2O_3 -CaS 系夹杂物。由图 2 (a) 可见, 当精炼进行到 LF 末期时, 钢中的夹杂物 CaS 含量较高, 这是由于本次试验在转炉出钢的时候就向钢包中加入了大量 CaO, 出钢完毕迅速在渣面撒适量铝粒对炉渣进行改质, 使出钢后迅速形成高碱度低氧化性的精炼渣, 这种精炼渣具有很高的硫容量, 脱硫能力很强, 加上吹氩对熔池的搅拌效果, 使反应 (1) 顺利进行。



上述反应产物 CaS 依附在钢中其他夹杂物上析出, 形成了 CaO (MgO)- Al_2O_3 -CaS-SiO₂ 系复合夹杂物。第 2 炉 LF 后期 Al_2O_3 含量增多, 可能是后期加

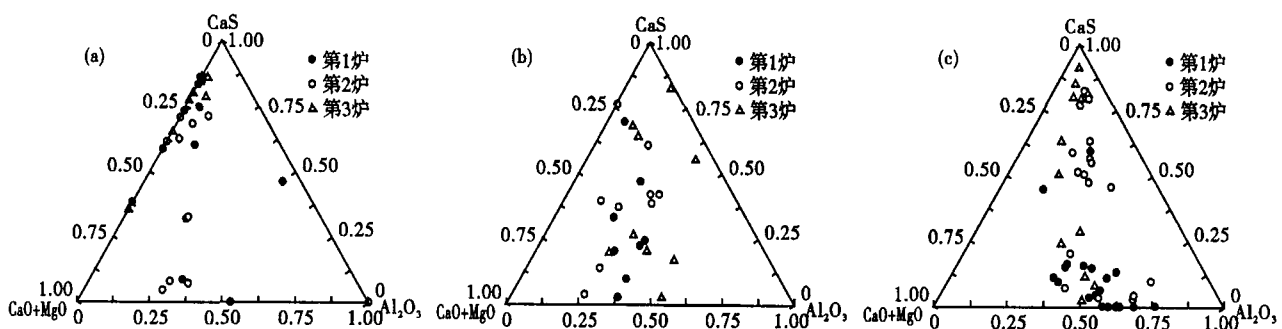


图 2 LF 精炼末期 (a)、VD 末期 (b) 钢水和铸坯 (c) 中夹杂物成分

Fig. 2 Ingredient of inclusions in liquid steel at end phase of LF (a), end phase of VD (b) and in cast billet (c)

入了一批铝粒, 生成的 Al_2O_3 还没来得及上浮。第 1、3 炉 Al 的脱氧产物 Al_2O_3 含量比较少, 这是由于出钢时加入了足量的强脱氧剂铝, 在出钢流对钢包熔池的强烈冲刷作用下, 迅速与钢中溶解氧反应生成大量簇群状的 Al_2O_3 , 这些脱氧产物很容易上浮去除, 在 LF 精炼末期, 钢水与夹杂物以及炉渣远未达到平衡, 所以夹杂物成分比较离散。

图 2 (b) 是 VD 处理末期钢水中的夹杂物成分情况 (第 3 炉为破空时的夹杂物情况), 此时钢中夹杂物的 SiO₂ 含量有所增加, 但仍在 10% 以下。由图

2 (b) 可见, 钢水经过真空脱气以及钙处理软吹后, 钢中的夹杂物仍然是 CaO (MgO)- Al_2O_3 -CaS-SiO₂ 系, 夹杂物成分逐渐向图示浓度三角形的右下方移动, 夹杂物中的 CaO (MgO)/ Al_2O_3 在 1.5 左右。在真空以及软吹氩条件下, 钢液中夹杂物进一步上浮。因此, 在扫描电镜观察过程中发现, 钢中的夹杂物数量明显减少。

铸坯中的夹杂物主要为 CaO (MgO)- Al_2O_3 -CaS-SiO₂-TiN 复合夹杂, 其中 SiO₂ 含量为 10% 左右。由图 2 (c) 可见, 夹杂物的 CaO (MgO)/ Al_2O_3 接近 1,

熔点较低。第3炉铸坯较破空时,夹杂物的CaS成分明显增加,最高的达到80%以上,可能是由于钢中氧含量很低,硫含量较氧含量高很多,而且VD破空后对钢水进行钙处理后,反应(1)式的进行使得生成了大量的CaS,因此用扫描电镜观察到更多的是含CaS的夹杂物。

3 讨论

试验要求转炉双渣操作,出钢严格挡渣,控制精炼渣的SiO₂含量,为造高碱度渣创造条件。除此之外,要求出钢时少加含Si合金,大量的[Si]在LF中后期加入,此时熔池的氧化性很弱,这样既能保证Si的稳定收得率,也能减少因为Si的脱氧产物对炉渣碱度的影响;出钢后迅速在渣面撒铝粒,尽快形成高碱度低氧化性的精炼渣。

试验从出钢完毕到VD结束离站,总时间达到120 min。

图3(a)是LF精炼末期的典型CaO(MgO)-Al₂O₃-CaS-SiO₂夹杂物,尺寸大小在10 μm左右;图3(b)是VD末期的CaO(MgO)-Al₂O₃-CaS-SiO₂夹杂物,可见在夹杂的表面有许多球状的析出物,能谱分析结果显示,这些小的析出颗粒是CaS;图3(c)是在铸坯试样中观察到的TiN夹杂物,这种夹杂物硬而脆,棱角分明,对钢材的疲劳性能影响最大^[9];图3(d)是铸坯中夹杂物,可以看到铸坯中的夹杂物尺寸较小,在5 μm左右,形状为球形或类似球形,没有明显的棱角。

从表3可知,对钢材疲劳性能影响最大的B类、D类夹杂物级别都很低,而且晶粒度达到8.5

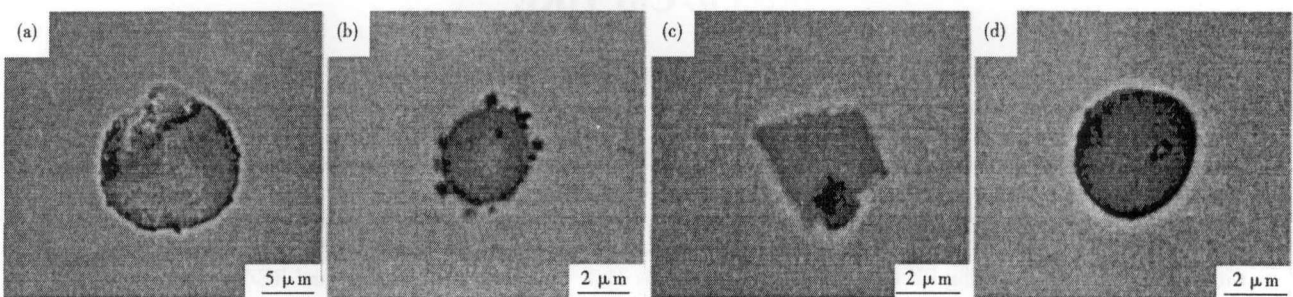


图3 弹簧钢60Si2Mn中典型夹杂物的形貌,SEM:(a)LF末期;(b)VD末期;(c)铸坯中的TiN;(d)铸坯

Fig.3 Morphology of typical inclusions in spring steel 60Si2Mn, SEM: (a) at end phase of LF; (b) at end phase of VD; (c) TiN in cast billet; (d) in cast billet

表3 弹簧钢60Si2Mn轧材的夹杂物评级、晶粒度、抗拉强度和断面收缩率

Table 3 Inclusion rating, grain size rating, tensile strength and reduction of area of spring steel 60Si2Mn rolled products

A		B		C		D		晶粒度/ 级	抗拉强 度/MPa	断面收 缩率/%
细	粗	细	粗	细	粗	细	粗			
0	0	1	0.5	0.5	0	0.5	0	8.5	1 144	35

级,其他各性能指标都比较优异。

4 结论

(1)LD-LF(VD)-CC生产高品质汽车用弹簧钢60Si2Mn,采用Al脱氧,出钢迅速造高碱度低氧化性精炼渣,尽量延长渣钢精炼时间,加强吹氩搅拌,最终铸坯T. O在 10×10^{-6} , [S]0.005%, [P]0.010%,获得了较高纯净度的铸坯。

(2)由于精炼初期就造成的高碱度低氧化性的炉渣,这种炉渣对脱硫非常有利,所以钢样中夹杂物含有比较多的脱硫产物CaS,虽然后期逐渐减少,但是钙处理后又有增加趋势。

参考文献

- Lund T, Lyrberg R. Valve Spring Wire Rod Manufacturing. Wire J Int. 1984, 17(8):64
- Oka E, Kurosu N, Ebihara T, et al. New High-quality Rod for Suspension Spring in Automobile. Wire J Int. 1984, 17(5):57
- 福本一郎. 高纯净棒钢制造技术的最近の进步,西山纪念技术讲座. 日本铁钢协会, 1988:123
- Yoon B H, Heo K H, Kim J S, et al. Improvement of Steel Cleanliness by Controlling Slag Composition. Ironmaking and Steelmaking. 2002, 29(3):215
- Kiyoshi, Shiwaka, Jiro Koarai, et al. Super Clean Steel for Valve Spring. 神户制钢技报, 1985, 35(4):79
- Hagiwara Toshiaki, Kawami Akira, Ueno Akihiko, et al. Super-clean Steel for Valve Spring Quality. Wire J Int. 1991(4):31
- 谢文新, 沈建军. 60Si2CrVAT 弹簧钢 EAF-LF(VD)-CC 工艺实践. 特殊钢, 2003, 24(3):56
- 吕瑞国, 李京军, 阮细保. 100 t 转炉-钢包炉精炼-连铸生产 65Mn 弹簧钢的工艺实践. 特殊钢, 2005, 26(4):52
- 阿部孝行, 古谷佳之, 松岡三郎. 高强度钢のギカサイクル疲労に ずは为介在物寸法と种类の重要性. 铁と钢, 2003(6):89

周红霞(1983-),女,北京科技大学在读硕士研究生,从事钢铁冶炼技术研究。

收稿日期:2007-09-03