

· 工艺技术 ·

120 t LD-LF-RH-BCC 流程生产齿轮钢的氧含量控制工艺

陈天明¹ 杨素波¹ 赵克文^{1,2} 王新华² 曾建华¹ 陈永¹

(1 攀枝花钢铁集团公司,攀枝花 617000; 2 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘要 分析了齿轮钢中氧含量控制的关键技术:精炼渣 SiO_2 含量, $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$, $(\text{FeO} + \text{MnO})$, RH, 氩气搅拌, 连铸工艺。结合攀枝花新钢钒股份有限公司炼钢厂的工艺条件,通过控制转炉终点 $[\text{C}] \geq 0.10\%$, 钢包渣厚 50 ~ 80 mm, 出钢过程加高碱度精炼渣, LF 白渣精炼 [渣中 T. Fe-0.43%, $(\text{MnO} + \text{FeO})$ -0.93%, SiO_2 -5%, 平均 $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ -1.9], 20 min RH 处理, 连铸保护浇铸等工艺措施, 并在炉后平台, LF 精炼和钙处理过程采用合适的吹氩模式, 使 20CrMoH 齿轮钢铸坯总氧含量 $\leq 15 \times 10^{-6}$, 平均总氧含量为 11.8×10^{-6} 。

关键词 20CrMoH 齿轮钢 转炉 大方坯 氧含量控制

Controlling Technology on Oxygen Content in Gear Steel Produced by 120 t LD-LF-RH-BCC Flow Sheet

Chen Tianming¹, Yang Subo¹, Zhao Kewen^{1,2}, Wang Xinhua², Zeng Jianhua¹ and Chen Yong¹

(1 Panzhihua Iron and Steel Group Co, Panzhihua 617000;

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

Abstract The key technology for controlling the oxygen content in gear steel is analyzed including SiO_2 content in refining slag, $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$, $(\text{FeO} + \text{MnO})$, RH, Ar stirring and concasting process. Combined with process conditions at Vanadium Recovery and Steelmaking Plant, Panzhihua New Steel-Vanadium Co Ltd, with the process measures such as controlling converter end $[\text{C}] \geq 0.10\%$, ladle slag thickness 50 ~ 80 mm and adding high basicity slag during tapping, LF white slag refining [in slag T. Fe-0.43%, $(\text{MnO} + \text{FeO})$ -0.93%, SiO_2 -5%, average $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ -1.9], RH treatment for 20 min, shielded continuous casting, and using suitable argon blowing models in ladle at back platform of converter, during LF refining and calcium treating, the total oxygen content in bloom of gear steel 20CrMoH is $\leq 15 \times 10^{-6}$, and the average total oxygen content is 11.8×10^{-6} .

Material Index Gear Steel 20CrMoH, Converter, Bloom, Control of Oxygen Content

近年来,随着我国汽车工业的飞速发展,汽车齿轮钢需求量不断增大,同时对其使用寿命要求也越来越高。钢中 $T[\text{O}]$ 是影响齿轮钢疲劳寿命的一个重要因素, $T[\text{O}] \leq 15 \times 10^{-6}$ 的低氧含量脱气钢疲劳寿命显著高于高氧含量的非脱气钢。

2006 年,攀钢与北京科技大学合作开发以 20CrMoH 为代表的超低氧齿轮钢生产工艺,经过两年的研究及生产实践,形成了铸坯 $T[\text{O}] \leq 15 \times 10^{-6}$ 的生产技术。

1 氧含量控制关键技术分析

超低氧 20CrMoH 齿轮钢采用的生产工艺流程如下:铁水预处理→120 t LD 转炉→挡渣出钢→脱氧合金化、钢渣改质→炉后底吹氩精炼→LF 底吹氩、调温、钢渣还原精炼处理→RH 成分精确控制、去气、去夹杂→钢水钙处理→大方坯连铸机→产品成材加工。

出钢过程中加入足量铝进行脱氧,在 LF 精炼过程中进一步用还原剂造白渣、加强扩散脱氧, RH

处理后期加铝进一步降低钢中氧含量和调整钢中 $[\text{Al}]_s$ 。为保证在精炼过程中获得良好的脱氧效果,本试验采用高碱度渣精炼工艺,并对精炼渣的组成和氧化性进行有效控制,LF 及 RH 处理结束实施“软吹”促进夹杂物上浮。

1.1 转炉初炼钢水氧含量控制

在转炉冶炼过程中,通过均衡装料、复吹搅拌以及副枪测量、炉气分析等手段,达到降低冶炼终点钢液及炉渣的氧化性的目的^[1]。图 1 为攀钢转炉冶炼终点 $[\text{C}]$ - $[\text{O}]$ 关系。由图 1 可见,随着 $[\text{C}]$ 的下降,钢液氧活度升高,特别是 $[\text{C}] \leq 0.10\%$ 时,即使 $[\text{C}]$ 微小下降,钢液氧活度含量也大幅度上升。由图 1 可以看出,如果将冶炼终点 $[\text{C}]$ 控制在 $\geq 0.10\%$, 则钢中的氧活度在 600×10^{-6} 以内。

1.2 转炉出钢过程钢水预精炼技术

严格控制钢包下渣量是降低钢包渣氧化性的最有效办法^[1]。攀钢在 2003 年开始采用挡渣镖挡渣,挡渣效果显著,钢包渣厚度控制在 50 ~ 80 mm,同时

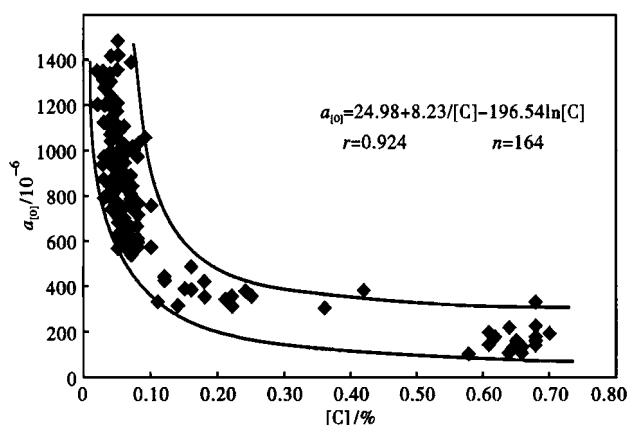


图 1 攀钢 120 t 转炉终点 [C]-[O] 关系图

Fig. 1 Relation between 120 t converter end [O] and [C] at Pansteel

采用干净的钢包盛装钢水。

其次,出钢过程加入高碱度精炼渣,入量为 4 ~ 6 kg/t_钢,并采用硅钙钡或铝等还原剂对钢包渣进行脱氧,初步控制钢包渣组份和降低钢包渣氧化性,使 (FeO + MnO) ≤ 1%,达到脱硫、脱氧及去除钢水中非金属夹杂物的“预精炼”目的,并能缩短 LF 化渣时间,延长白渣精炼时间,提高精炼效果。所用高碱度精炼渣的主要化学成分要求见表 1。

表 1 高碱度预精炼渣组成/%

| Table 1 Ingredient of high basicity pre-refining slag / % | | | | |
|---|--------------------------------|------------------|------------------|-----|
| CaO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | CaF ₂ | MgO |
| ≥70 | ≤4 | ≤5 | 6~14 | ≤8 |

1.3 精炼渣成分控制

1.3.1 精炼渣系的选择

为达到控制钢中 T[O] 的目的,精炼渣系的选择是其中最重要的内容之一。各国冶金工作者先后研究了许多精炼渣系,按渣系中的主要作用成分划分,应用较多的渣系有 CaO-CaF₂、CaO-Al₂O₃ 和 CaO-Al₂O₃-CaF₂。在实际生产中受转炉下渣及脱氧产物的影响,这些渣系的组成中均含有一定的 SiO₂ 或 MgO,因此,本试验精炼渣的组成选择为 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 系三元相图的低熔点位置。

1.3.2 精炼渣中 SiO₂ 含量

钢包渣的碱度及组成对精炼过程的脱氧有较大影响,当 CaO 含量过高后,渣中会有固相质点析出,使炉渣粘度上升,流动性变差,从而影响了脱氧的动力学条件^[2]。但近年来,日本 LF 精炼渣普遍采用高碱度精炼渣(有时渣中 CaO 含量高达 65%),仍获得较好的精炼效果。其原因在于渣加入了较多的

Al₂O₃,解决了炉渣流动性的问题。研究表明^[3],随着炉渣碱度提高和渣中 SiO₂ 含量的降低,脱氧能力提高,钢水中溶解氧含量降低。文献[4]的研究也得到了同样的观点,降低渣中 SiO₂ 含量可以降低钢水中溶解氧含量,当渣中 SiO₂ ≤ 5% 时,精炼结束时钢水中溶解氧可降至 10 × 10⁻⁶ 以下。这是由于随渣中 SiO₂ 含量的降低,使 SiO₂ 活度系数大幅度降低,从而可避免或减小渣中 SiO₂ 与钢中 Al 的反应对钢液带来的污染。

1.3.3 精炼渣 CaO/Al₂O₃

除渣的碱度、CaO 和 SiO₂ 含量外,渣中 CaO/Al₂O₃ 比值对脱氧有着不可忽视的作用。文献[3]研究了 CaO/Al₂O₃ 比值与钢中 T[O] 的关系,在 SiO₂ ≤ 10% 时,当 CaO/Al₂O₃ 比值 ≥ 1.0,钢中 T[O] ≤ 15 × 10⁻⁶,而 CaO/Al₂O₃ 比值为 0.33 时,钢中 T[O] 为 44 × 10⁻⁶,由此认为要获得较好的脱氧能力,炉渣中的 CaO/Al₂O₃ 比值应 > 1.0,且随比值的提高脱氧速度越快。韩国浦项钢铁公司在生产轴承钢时,将炉渣 CaO/Al₂O₃ 比值由 2.0 ~ 4.4 降低至 1.7 左右,钢中平均 T[O] 由 12 × 10⁻⁶ 降低至 8 × 10⁻⁶,且最高 T[O] 为 12 × 10⁻⁶。该结果表明,CaO/Al₂O₃ 比值并非越高越好,而应控制在适当的范围内^[5]。

1.3.4 钢包中 (FeO + MnO)

钢包渣氧化性对精炼过程的脱氧影响较为显著。日本钢管在生产低氧钢时,将 RH 处理前的渣中 (FeO + MnO) 含量降至 1.0% 以下,处理后 T[O] 基本都 ≤ 10 × 10⁻⁶;爱知钢厂在生产轴承钢时得到了相同的结论,甚至要求将渣中 (Fe₂O₃ + MnO) 含量降低至 0.5% 以下。本试验 RH 处理前渣中 (FeO + MnO) 按 ≤ 1.0% 控制。

1.4 RH 处理工艺

为保证脱气效果和促进夹杂物上浮,RH 真空处理时间 ≥ 20 min,其中真空度 ≤ 300 Pa 的处理时间 ≥ 15 min,提升气流量控制在 1.2 ~ 1.4 m³/min。处理后期加入铝丸调整钢水中 Als 含量,随后的合金均匀化时间要求在 6 min 以上。

1.5 钢包底吹氩比搅拌功率选择

氩气搅拌加速钢-渣之间物质传递,改善钢-渣界面反应的动力学条件,有利于钢液脱氧、脱硫反应,吹氩搅拌是促使夹杂物上浮的重要手段。对于大尺寸的液态夹杂物,其上浮析出不存在热力学困难,但需注意控制搅拌强度,因为过强的搅拌会导致液态夹杂物或渣滴与钢液乳化而不利于夹杂物上浮

排出,也易将钢渣重新卷入钢水深处^[6]。

本试验中炉后吹氩站和 LF 精炼均采用全程吹氩模式, RH 进行钙处理时也进行吹氩。根据比搅拌功率来确定吹氩流量的大小,在炉后小平台和 LF 前期处理过程中,以脱氧、脱硫为主要目的,比搅拌功率为 50.0 ~ 83.4 W/t,相应的吹氩流量为 0.30 ~ 0.50 m³/min,在 LF 后期处理和 RH 钙处理过程中,以去除夹杂为主要目的,比搅拌功率为 8.4 ~ 33.4 W/t,对应的吹氩流量控制在 0.05 ~ 0.20 m³/min,比搅拌功率按下式进行计算^[7]:

$$\omega = \frac{6.18 Q_{Ar} T_l}{W_g} \left[1 - \frac{T_n}{T_l} + \ln \left(1 + \frac{H_0}{1.46 \times 10^{-5} P_2} \right) \right] \quad (1)$$

式中: ω - 比搅拌功/(W · t⁻¹); Q_{Ar} - 吹氩流量/(m³ · min⁻¹); W_g - 钢水质量/t; T_l - 钢水温度/K; T_n - 氩气温度/K; H_0 - 钢水深度/m; P_2 - 渣面氩气出口压力(真空度)/Pa。

1.6 保护浇铸

对于低氧高品质汽车齿轮钢,保护浇铸是防止钢液二次氧化的有效措施,特别是开浇、换包、拉速波动或浇次结束等非稳态浇铸时。首先通过优化钢包水口填料,提高水口自开率,杜绝吹氧开浇或敞开浇铸。其次对钢包到中间包、中间包到结晶器采用吹氩保护,防止吸入空气。第三,钢包到中间包采用长水口和保护套管并吹入氩气,中间包到结晶器采用浸入式水口浇铸,避免钢液的二次氧化和卷渣。

2 试验结果

2.1 LF 钢包渣成分控制结果

在 LF 加热精炼前加入 6 kg/t_钢左右的高碱度精炼渣,同时加入一定量的硅钙钡或铝等还原剂对钢水进行“白渣”精炼。精炼过程根据钢包渣的颜色、状态适当补加高碱度精炼渣和还原剂,钢水 LF 精

炼结束钢包渣组成见表 2。从表 2 可以看出,钢包渣成分控制较好,基本达到了预期目标成分。渣中 T. Fe 为 0.43% 左右, MnO 为 0.2% 左右 [(MnO + FeO) 为 0.93% 左右], SiO₂ 为 5% 左右,平均 CaO/Al₂O₃ 比值为 1.9。

表 2 LF 精炼终点钢包渣组成和碱度

Table 2 Ingredient and basicity of ladle slag at end LF refining

| 项目 | 精炼渣成分/% | | | | | | CaO/ Al ₂ O ₃ | CaO/ SiO ₂ |
|----|-------------|--------------------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|--|--------------------------|
| | CaO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | CaF ₂ | MnO | T. Fe | | |
| 范围 | 48.8 ~ 61.1 | 24.2 ~ 35.0 | 3.4 ~ 7.1 | 3.4 ~ 6.2 | 0.16 ~ 0.40 | 0.32 ~ 0.56 | 1.7 ~ 2.2 | 7.9 ~ 14.4 |
| 平均 | 54.9 | 28.8 | 5.5 | 4.6 | 0.2 | 0.43 | 1.9 | 10.5 |

经过 LF 精炼,钢中平均 T[O] 由 17.9 × 10⁻⁶ 下降为 14.8 × 10⁻⁶,降低了 17.3%。表明通过 LF“白渣”精炼,有效去除了钢中的夹杂物,钢中 T[O] 降低。

2.2 过程 T[O] 变化

从图 2(a) 可见,由于在出钢过程采用铝进行强脱氧和加入高碱度精炼渣进行渣洗,出钢后吹氩处理,LF 精炼前钢水的 T[O] 已降低至 (12 ~ 20) × 10⁻⁶。

由图 2(b) 可见,LF 精炼结束时 T[O] 随 Als 增加而降低,如果将 Als 控制在 0.05% ~ 0.06%,则钢中 T[O] 在 15 × 10⁻⁶ 左右,能够满足要求。

从图 2(c) 可以看到,本试验 LF 精炼结束时,钢包在渣中 (FeO + MnO) 含量低于 0.8% 后,其变化对钢水 T[O] 影响不大。

图 2(d) 为 LF 精炼结束钢包渣 CaO/Al₂O₃ 比值与钢水 T[O] 的关系。由图 2(d) 可见,本试验条件下,将 CaO/Al₂O₃ 比值控制在 1.4 ~ 2.0,钢水 T[O] 较低,即 ≤ 16 × 10⁻⁶。

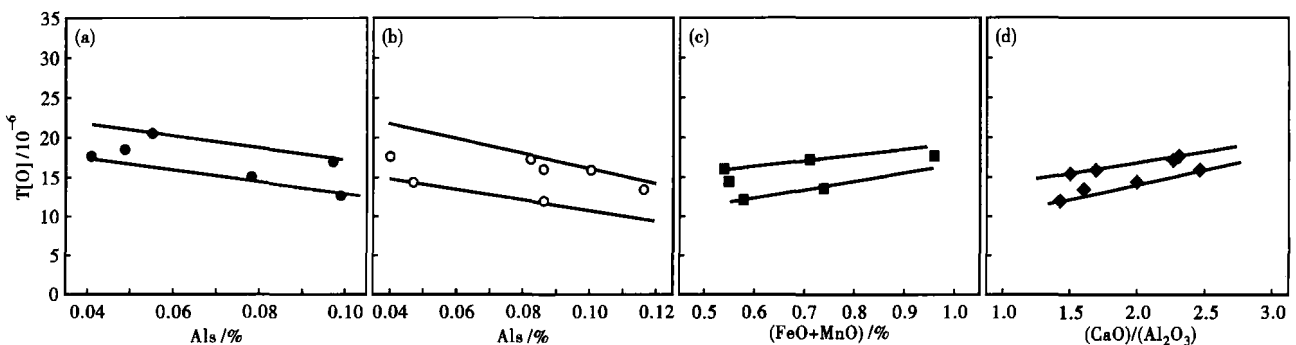


图 2 LF 前钢水 Als(a), LF 后钢水 Als(b), LF 后 (FeO + MnO) (c) 和 LF 后 (CaO)/(Al₂O₃) (d) 对 T[O] 的影响

Fig. 2 Effect of Als in liquid before LF refining (a), Als in liquid after LF refining (b), (FeO + MnO) after LF refining (c) and (CaO)/(Al₂O₃) after refining (d) on T[O]

图 3 为 RH 精炼后钢水 Al_s 含量与 T[O] 之间的关系。可以看到,钢水 T[O] 随 Al_s 降低而呈现降低的趋势,当 Al_s 含量控制在 0.040% 以上时,钢水 T[O] 在 16×10^{-6} 以内。

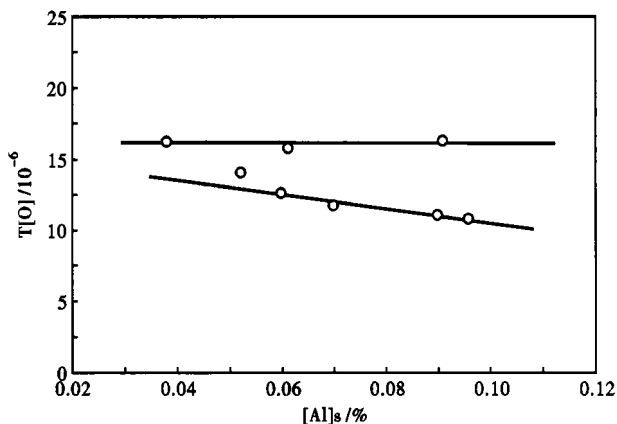


图 3 RH 精炼后钢水 Al_s 对 T[O] 的影响
Fig. 3 Effect of Al_s in liquid after RH refining on T[O]

试验钢铸坯氧含量检验结果见表 3。中间包第 1 炉为避免引流砂卷入钢液而未及时保护浇铸,钢液未得到有效覆盖而受到空气污染,铸坯 T[O] 达 26×10^{-6} 。中间包第 2~7 炉,铸坯的总氧含量波动在 $(9 \sim 14) \times 10^{-6}$, 平均为 11.8×10^{-6} 。通过加强中间包的使用管理及改善连铸保护浇铸效果,可在

表 3 铸坯氧含量
Table 3 Oxygen content in casting bloom

| 浇铸炉次 | 铸坯 T[O] / 10 ⁻⁶ |
|------------|----------------------------|
| 1 | 26 |
| 2 | 12 |
| 3 | 9 |
| 4 | 11 |
| 5 | 13 |
| 6 | 14 |
| 7 | 12 |
| 平均(除第 1 炉) | 11.8 |

一定程度上提高钢的纯净度,在工业大批量生产条件下也可以采用第 1 炉降级使用的方法加以解决。

3 结论

(1) 结合攀钢转炉-大方坯连铸流程的装备条件,通过选择合适的脱氧工艺,采取转炉出钢过程深脱氧、预精炼、LF 钢包渣成分控制及“白渣”精炼、连铸保护浇铸等针对性技术措施,并在炉后平台、LF 精炼及钙处理过程采用适宜的吹氩模式,使铸坯中的 T[O] 控制在 15×10^{-6} 以内,平均为 11.8×10^{-6} (中间包第 1 炉除外),实现了超低氧 20CrMoH 齿轮钢的生产。

(2) 中间包第 1 炉对钢的纯净度影响较大,通过加强对中间包的使用、保护浇铸等的管理,能在一定程度上提高钢的纯净度,工业大批量生产条件下,中间包第 1 炉可降级使用。

参考文献

- 王新华,姜钧普,王福明,等. 洁净钢-洁净钢生产工艺技术. 北京:冶金工业出版社,2006
- Seo Jeong-Do, Kim Seon-Hyo, Lee Chang-Hyun. Thermodynamic Assessment of Mg and Al Deoxidation Reactions in Liquid Iron. 1999 Steelmaking Conference Proceedings, 455
- Goro Okuyama, Koji Yamaguchi, Syuji Takeuchi, et al. Effect of Slag Composition on the Kinetics of Formation of Al₂O₃-MgO Inclusions in Aluminum Killed Ferritic Stainless Steel. ISIJ International, 2000(2): 121
- 森肇平野,长谷川. 2 次精炼 Y による Al キルト 鋼の脱酸. 鉄と鋼, 1986; S1110
- Hidekazu Todoroki, Kenji Mizuno. Effect of Silica in Slag on Inclusion Compositions in 304 Stainless Steel Deoxidized with Aluminum. ISIJ International, 2004, 44(8): 1350
- 龙 杰. 发挥炉外精炼优势 促进高纯净钢生产. 宽厚板, 2000, 6(5): 11
- 张 鉴. 炉外精炼的理论与实践. 北京:冶金工业出版社, 1993

陈天明(1970-),男,硕士,高级工程师,1995 年重庆大学毕业,精炼、连铸工艺和钢的质量控制。

收稿日期:2009-07-30

下 期 要 目

| | |
|---------------------------------------|------|
| 含硫齿轮钢 20CrMnTiH1 钙处理热力学和控制技术的研究 | 林 平等 |
| 单嘴精炼炉合金料加入方式及混匀特性水模型研究 | 秦 哲等 |
| 低碳钢奥氏体中 Ti 夹杂溶解度积的分析 | 亓海全等 |
| 底吹氩过程 LF 炉盖内气体流动的数值模拟 | 储 莹等 |
| 高速线材 10 道次精轧过程的有限元模拟 | 刘 升等 |
| 控流装置对板坯中间包流场优化的影响 | 冯 捷等 |
| 唐钢 50 t 复吹转炉水模型的实验研究 | 曾亚南等 |