

· 实验研究 ·

真空感应熔炼过程炉衬材料向钢液供氧现象的研究

薛正良 高俊波 齐江华

李正邦 张家雯

(武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081) (钢铁研究总院, 北京 100081)

摘 要 通过 50 kg 镁砂坩埚和 25 kg 氧化钙砂坩埚真空感应炉进行了真空熔炼过程炉衬耐火材料向钢液供氧试验, 以研究炉衬耐火材料向钢液供氧的基本规律和影响炉衬向钢液供氧的主要因素。试验结果表明, 在超低氧范围内对钢液进行深度脱氧时, 避免炉衬分解对钢液供氧是进一步脱氧的关键; 在 0.5 ~ 10 Pa 的真空下, 随真空度和熔池钢水温度升高, 炉衬分解向熔池供氧增加, 并且钢中最终氧含量随钢液碳烧损量的增加而增加; 镁砂炉衬向钢液的供氧量大于氧化钙炉衬向钢液的供氧量。

关键词 真空感应熔炼 坩埚 炉衬供氧

A Study on Oxygen Contamination from Crucible Material on Molten Steel during Vacuum Induction Melting

Xue Zhengliang, Gao Junbo and Qi Jianghua

(School of Materials Science and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Li Zhengbang and Zhang Jiawen

(Central Iron and Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The phenomena of oxygen contamination from crucible materials on molten steel during vacuum melting has been studied by a 50 kg vacuum induction furnace with magnesite crucible and a 25 kg vacuum induction furnace with calcia crucible to research the basic law and main factors of oxygen contamination from crucible materials on molten steel. The results showed that avoiding oxygen contamination from crucible materials on molten steel during vacuum induction melting was key factor for deep deoxidization of molten steel in extra-low oxygen content range; in 0.5 ~ 10 Pa vacuum melting, with vacuum and temperature of molten steel in bath increasing the oxygen contamination from crucible materials on molten steel increased, and the final oxygen content in steel increased with carbon burning loss of molten steel increasing; the oxygen contamination of molten steel melting with magnesite crucible was more than that with calcia crucible.

Material Index Vacuum Induction Melting, Crucible, Oxygen Contamination from Crucible Material

真空冶金条件下炉衬材料向钢液供氧意味着钢液中合金元素的烧损, 严重时会造成碳和活泼合金元素成分出格; 钢液中合金元素烧损的同时也造成氧化物夹杂的增加, 在这种情况下, 即使钢液成分合格, 也会因氧化物夹杂含量升高而影响钢材的使用性能。特别是在超低氧钢熔炼过程中, 避免炉衬材料向钢液供氧至关重要。早在 20 世纪 60 年代, 邵象华先生等^[1]研究发现坩埚供氧的一个重要来源是渗透到坩埚壁中的部分金属在感应炉出钢后高温下破真空时被空气氧化, 在下次熔炼时重新进入熔池。

本研究工作主要是通过通过在真空感应熔炼过程中对熔池状态的观察和最终钢液化学成分的分析, 探索炉衬材料分解向钢液供氧的基本规律, 研究炉衬向熔池供氧的条件, 为制定超低氧钢真空熔炼工艺提供实验依据。

1 用镁砂炉衬熔炼时的坩埚供氧现象

在 50 kg 真空感应炉中用电熔镁砂捣打炉衬进行第 1 次试验, 对经表面喷丸除锈的碳素钢棒进行增碳, 使钢中碳含量从原始的 0.33% 增到 0.55%。熔化功率保持在 70 ~ 80 kW。由于钢棒原始氧含量不高 (0.001 3% T.O), 见钢水后无飞溅现象, 因此, 钢棒熔化过程中机械泵 (即旋片式真空泵) 始终开启, 真空度维持在 10 Pa 左右。熔清后钢液温度偏高, 观察熔池表面有亮气泡冒出; 降低输入功率至 30 ~ 40 kW 后钢液面不再冒泡。随后向炉内充氩至 60 kPa 左右, 向熔池补碳, 碳熔清后降温出钢。分析钢锭碳含量为 0.47%, 熔化过程中碳烧损量为 0.08%, 氧含量也从 0.001 3% 升高到 0.001 7%。

第 2 次试验也是在 50 kg 真空感应炉中进行,

炉衬仍为新捣电熔镁砂坩埚。试验目的是对含碳0.46%和0.48%的钢锭进行重熔,以便将钢中的碳含量降低到0.44%,稀释剂是含0.2% C、0.002% T.O的钢棒。钢锭和稀释剂都经喷丸除锈处理。熔炼结果见表1。由表1可见,第1炉钢碳烧损达0.13%,这炉钢在精炼前期熔池表面严重冒亮泡,时间长达7 min。当看到熔池温度偏高后将输入功率从60 kW降低到30 kW,冒泡现象马上停止。在第2和第3炉钢的熔炼过程中,钢料熔清后即维持较低的输入功率,基本上未出现冒泡现象,钢的碳烧损仅为0.03%。

表1列出50 kg真空感应炉用镁砂坩埚熔炼的两次试验中钢中碳和氧含量的变化。

表1 50 kg真空感应炉用镁砂坩埚熔炼时钢的碳和氧含量的变化

Table 1 Change of carbon and oxygen content in steel during refining in a 50 kg vacuum induction furnace with magnesite crucible

试验次数	项目	C/%	T.O/10 ⁻⁶	
I	目标含量	0.55	-	
	原始含量	0.33	13	
	实际含量	0.47	17	
II	目标含量	0.44	-	
	第 1 炉 原始含量	0.46	16	
		第 2 炉	0.48	15
		第 3 炉	0.48	8
	第 1 炉 实际含量	0.31	20	
		第 2 炉	0.41	15
		第 3 炉	0.41	15

2 用氧化钙坩埚熔炼时的坩埚供氧现象

用氧化钙砂捣打的坩埚熔炼钢液是在25 kg真空感应炉上进行的。用氧化钙坩埚熔炼的目的是为了进一步降低钢中的氧含量,同时在精炼过程中对钢水进行补碳。3个待熔钢锭经表面喷丸除锈,碳含量分别为0.31%、0.41%、0.41%(表2)。坩埚内见钢水后充氩至60 kPa左右,棒料熔清后补加碳至0.42%,然后开罗茨泵将真空度提高到0.5 Pa。在精炼8~10 min以后,3炉钢都不同程度出现冒亮泡现象。分析钢锭碳含量,碳实际烧损量在0.04%~0.08%。

用氧化钙坩埚进行第2次试验的钢棒原始含0.37% C、0.003% T.O。考虑到熔炼过程中碳可能有烧损,配料时将总碳量提高到0.47%。精炼过程中通过控制输入功率维持较低的熔池温度。在20 min精炼时间内钢液面平静,无冒泡现象。分

析4炉钢的碳含量基本上无烧损现象,钢中氧含量也很低。

表2列出25 kg真空感应炉用氧化钙坩埚熔炼的两次试验中对钢中碳和氧含量的变化。

表2 25 kg真空感应炉用氧化钙砂坩埚熔炼时钢的碳和氧含量的变化

Table 2 Change of carbon and oxygen content in steel during refining in a 25 kg vacuum induction furnace with calcia crucible

试验次数	项目	C/%	T.O/10 ⁻⁶	
I	目标含量	0.42	—	
	原始含量	第 1 炉	0.31	20
		第 2 炉	0.41	15
		第 3 炉	0.41	15
	实际含量	第 1 炉	0.33	13
		第 2 炉	0.34	14
		第 3 炉	0.37	9
II	目标含量	0.47	—	
	原始含量	0.37	30	
	实际含量	第 1 炉	0.46	13
		第 2 炉	0.48	13
		第 3 炉	0.48	8
		第 4 炉	0.47	6

3 讨论

3.1 钢液中的碳氧反应

溶解于钢液中的碳和氧在真空下将按反应

(1)反应产生CO气体:



$$\Delta G^0 = -22\,363 - 39.625\,T \text{ (J/mol)} \quad (2)$$

钢液中的氧一方面来自原料中的氧,另一方面来自真空下炉衬材料的热分解反应:

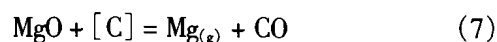


$$\Delta G^0 = 621\,984 - 208.12\,T \text{ (J/mol)} \quad (4)$$

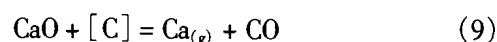


$$\Delta G^0 = 677\,578 - 196.92\,T \text{ (J/mol)} \quad (6)$$

当钢液中溶解有较高含量的碳时,真空下炉衬材料的热分解将变得更加容易:



$$\Delta G^0 = 599\,621 - 247.75\,T \text{ (J/mol)} \quad (8)$$



$$\Delta G^0 = 655\,215 - 236.55\,T \text{ (J/mol)} \quad (10)$$

当炉衬材料一定时,炉衬材料分解向熔池的供氧速度以及因炉衬材料供氧钢液可能达到的最

高理论氧含量($[O]_{\text{炉衬}}$)实际上决定于熔池温度和熔炼真空度,温度和真空度越高,炉衬供氧使熔池达到的最高理论氧含量($[O]_{\text{炉衬}}$)也越高^[2]。当钢液中实际氧含量高于炉衬供氧的最高理论氧含量($[O]_{\text{炉衬}}$)时,炉衬材料不发生热分解,这时钢液中碳氧反应按(1)进行;当钢液中实际氧含量低于炉衬供氧的最高理论氧含量($[O]_{\text{炉衬}}$)时,炉衬材料的热分解将对钢液供氧。这时熔池液面上冒出的CO气泡主要来自反应(7)和(9)。

3.2 熔池冒泡现象与钢液碳烧损和钢中氧含量的关系

用真空感应炉熔炼含碳合金过程中可以观察到两种不同的冒泡现象:第1种冒泡现象通常发生在熔清以后及精炼初期,气泡呈黑色,表明熔池温度并不高,这是钢液中溶解氧含量较高时按反应(1)进行的碳脱氧反应,这时的碳烧损量可以通过化学反应方程准确计算出来。第2种冒泡现象往往发生在精炼阶段,有时在精炼中期开始冒泡,气泡呈亮白色,表明熔池温度偏高。这时钢液中溶解氧含量已经低于相应熔池温度和熔炼真空度下炉衬供氧的最高理论氧含量($[O]_{\text{炉衬}}$),钢液脱碳的氧源来自炉衬热分解,碳的烧损量将随冒泡时间延长而增加。

1 600 °C时氧化镁在 10 Pa 真空度下的 $[O]_{\text{炉衬}} = 0.0127\%$,氧化钙在 0.5 Pa 真空度下的 $[O]_{\text{炉衬}} = 0.0018\%$ ^[2,3]。因此,在用镁砂坩埚真空感应熔炼时要完全避免坩埚供氧是十分困难的,通过控制感应圈输入功率来控制熔池温度在较低的水平,可以减轻坩埚供氧强度,减少碳的烧损和降低钢液氧含量(如表1的第2、3炉钢)。真空中氧化钙的热分解稳定性远高于氧化镁,尽管如此,在用氧化钙坩埚熔炼钢液时,仍然存在坩埚供氧现象(如表2),这主要是因为氧化钙导热率低,坩埚保温性能好,在一定输入功率下熔池温度仍在缓慢升高,造成精炼中期钢液的冒泡现象。对于氧化钙坩埚,只要严格控制感应圈输入功率是完全可以避免炉衬供氧现象的(如表2)。

钢中最终氧含量的高低与坩埚供氧直接相关,无论是镁砂坩埚还是氧化钙坩埚,钢中最终氧含量均随碳烧损量的升高而增加,见图1。由此可见,真空感应熔炼超低氧钢的关键是合理选择炉衬材质,适当控制熔炼温度和真空度,避免炉衬

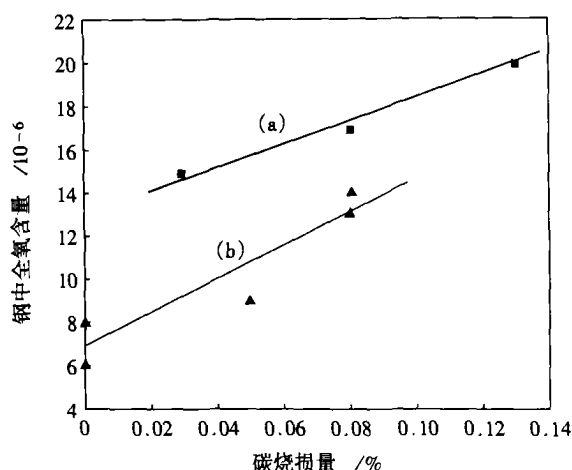


图1 真空感应熔炼时钢液碳烧损量对钢液氧含量的影响:(a) 镁砂坩埚;(b) 氧化钙坩埚

Fig.1 Effect of carbon burning loss of molten steel on oxygen content in steel during vacuum induction refining: (a) magnesia crucible; (b) calcia crucible

向钢液供氧。

4 结论

(1) 在超低氧范围内对钢液进行深度脱氧,避免炉衬分解对钢液供氧是关键。炉衬材质一定时,炉衬是否向钢液供氧决定于熔炼时钢液实际氧含量、熔炼真空度和熔池温度,真空度越高或熔池温度越高,炉衬分解向熔池供氧达到的最高理论氧含量($[O]_{\text{炉衬}}$)越高。当熔池实际氧含量低于 $[O]_{\text{炉衬}}$ 时,炉衬开始向钢液供氧。

(2) 炉衬向钢液供氧通常表现在精炼阶段熔池表面冒亮白色气泡,造成碳的烧损。碳烧损量越大,最终钢液中的氧含量也越高。

本课题为国家自然科学基金和上海宝钢集团公司联合资助项目(50374054,50174048)

参考文献

- 邵象华,知水,赵仁川,等.间歇式真空感应炉中坩埚供氧的一个来源.金属学报,1965,8(3):392
- 薛正良,李正邦,张家雯,等.用氧化钙坩埚真空感应熔炼超低氧钢脱氧动力学.钢铁研究学报,2003,15(4):5
- 薛正良,李正邦,张家雯,等.用氧化钙坩埚真空感应熔炼超低氧钢.特殊钢,2003,24(1):12

薛正良,男,42岁,博士,教授,冶金系主任。主要从事纯净钢冶炼、直接还原新工艺方面的研究。

收稿日期:2004-09-06