

· 工艺技术 ·

# 电弧炉钨钼钒氧化物矿直接合金化冶炼高速钢工业试验

周 勇 李正邦

(钢铁研究总院, 北京 100081)

**摘 要** 通过改变装入制度、采用低碱度渣工艺和控制渣量等措施, 实现了在重庆特钢 20 t 工业电弧炉内完全用白钨矿、氧化钼、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 直接合金化冶炼 M2( C 0.80 ~ 0.90C, 3.8 ~ 4.4Cr, 5.50 ~ 6.75W, 4.5 ~ 5.5Mo, 1.75 ~ 2.20V) 高速钢, 合金化率达到 [ W ] + [ Mo ] + [ V ] = 13%, 合金元素收得率( % ): W 95.25, Mo 98.01, V 90.72, 冶炼周期 283 min, 电耗 585 kWh/t, 成品钢材质量满足标准要求。

**关键词** 电弧炉 直接合金化 冶炼 高速钢 M2

## Industrial Test of High Speed Steel Making in Electric Arc Furnace by Direct Reduction and Alloying with Tungsten Molybdenum Vanadium Oxide Ore

Zhou Yong and Li Zhengbang

( Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081 )

**Abstract** The Industrial test of steelmaking of high speed steel M2 ( 0.80 ~ 0.90C, 3.8 ~ 4.4Cr, 5.50 ~ 6.75W, 4.5 ~ 5.5Mo, 1.75 ~ 2.20V ) by direct reduction and alloying with scheelite, molybdenum oxide and V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ore has been carried out in a 20 t electric arc furnace at Chongqing Special Steel. The results showed that the alloying rate was up to [ W ] + [ Mo ] + [ V ] = 13%, the yield of W, Mo and V alloying element was 95.25%, 98.01% and 90.72% respectively, the average tap-to-tap time was 283 min, the electric power consumption was 585 kWh/t and the quality of products met the requirement of standard.

**Material Index** Electric Arc Furnace, Direct Reduction and Alloying, Steelmaking, High Speed Steel M2

20 世纪 60 年代至本世纪初加拿大、乌克兰、美国先后探索在电弧炉内加钨精矿球团直接合金化, W 的合金化率达到 4%, 冶炼 M2 高速钢时仍需补加钨铁。乌克兰德聂泊尔特钢公司 18 t 电弧炉内加 MoO<sub>3</sub> 矿粉、Si-Ca 粉、工业 Si, 上压冷废钢, Mo 合金化率仅为 3%, 由于 MoO<sub>3</sub> 的挥发, Mo 收得率仅 86.4%。

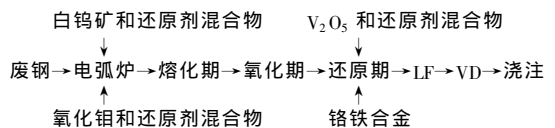
20 世纪 80 ~ 90 年代, 钢铁研究总院与大连特钢公司合作, 在 20 t 电弧炉内加 CaWO<sub>4</sub> 及 CaMoO<sub>4</sub> 冶炼高速钢, 钨和钼合金化率 W<sub>[W]%</sub> + W<sub>[Mo]%</sub> ≤ 5%, 冶炼高速钢仍需补加铁合金, 钨钼收得率 ≤ 88%<sup>[1]</sup>。为开发钨钼钒氧化物矿直接合金化冶炼高速钢工艺, 钢铁研究总院在理论研究的基础上<sup>[2]</sup>, 与重庆特殊钢公司合作, 进行了钨钼钒氧化物矿直接合金化冶炼高速钢的工业试验。

### 1 冶炼设备和炉料

重庆特殊钢公司电弧炉配有 LF(VD), 出钢量

为 20 t, 变压器额定功率为 5 500 kVA, 模铸冶炼钢种为 W6Mo5Cr4V2(M2) 高速钢, 其成分( % )为: C 0.80 ~ 0.90, Si 0.20 ~ 0.45, Mn 0.15 ~ 0.40, P ≤ 0.03, S ≤ 0.03, Cr 3.8 ~ 4.4, Mo 4.5 ~ 5.5, V 1.75 ~ 2.20, W 5.50 ~ 6.75。

工业试验共进行了 2 炉, 工艺流程为:



电弧炉炉料结构如表 1 所示。白钨矿、氧化钼和 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的成分如表 2 所示。

表 1 电弧炉冶炼 M2 高速钢的炉料结构/t  
Table 1 Charging structure for electric arc furnace steelmaking high speed steel M2 /t

低磷普碳钢	白钨矿	氧化钼	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	其它炉料 (还原剂、造渣剂)	合计
16	2.2	1.6	0.65	1.3	21.75

表 2 白钨矿、氧化钼和  $V_2O_5$  的化学成分/%Table 2 Ingredient of scheelite, molybdenum oxide and  $V_2O_5$ /%

炉料	合金元素 氧化物	CaO	SiO <sub>2</sub>	C	P	S	Cu	H <sub>2</sub> O
白钨矿	65.45 (WO <sub>3</sub> )	24.0	0.49	1.12	0.025	0.072	0.01	0.05
氧化钼	58.25 (MoO <sub>3</sub> )	10.3	11.27	0.035	0.062	0.185	0.05	
$V_2O_5$	98.74 (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )			0.01	0.003	0.002		

## 2 工艺特点

### 2.1 装入制度

白钨矿和氧化钼采用与还原剂混合的炉底装入法,选用 SiC 和 Fe-Si 作为还原剂,在熔化过程中 W、Mo 就开始还原,还原反应主要发生在熔化期,发生的还原反应包括固-固反应、液-固反应、铁浴还原反应和液-液反应,特点是边熔化边还原,反应平缓,容易操作。

白钨矿熔点高于废钢熔点,若将白钨矿放在远离电弧高温区的范围内,由于废钢先于白钨矿熔化,此时白钨矿粉(密度 5.9~6.1 g/cm<sup>3</sup>)将在形成的熔池中上浮,实验室实验表明,在很短的上浮时间内,白钨矿粉的还原率很低,这部分未熔化的矿粉将进入顶渣中,使炉渣粘度降低,不利于渣金反应的进行,降低了钨的收得率。为此应将白钨矿与还原剂放在电弧炉的高温电弧作用区域。

氧化钼的熔点低,挥发严重,因此应采用炉底装入法,而且本工艺开发出抑制氧化钼挥发技术,可有效抑制炼钢过程中氧化钼的挥发。

钒与氧的亲合力大于铁与氧的亲合力,较容易被氧化<sup>[3]</sup>,因此  $V_2O_5$  应在还原期初扒除氧化渣后加入,选用 SiC 作主要还原剂,并选用 Al 粉、电石作为辅助还原剂。 $V_2O_5$  熔点低(670 ℃),很快渣化,还原剂 SiC 的熔点很高(2 500 ℃),故主要发生固态还原剂还原渣中  $V_2O_5$  的固-液反应和渗入钢中的还原剂还原渣中  $V_2O_5$  的液-液反应。

还原期渣中 W、Mo 含量已降至 1.5% 以下,通过加入的 Fe-Si 继续还原。

### 2.2 碱度控制

适当的低碱度渣中的 CaWO<sub>3</sub> 和 MoO<sub>3</sub> 的活度较高<sup>[4]</sup>,有利于降低渣金间合金元素的分配比,提高合金元素的收得率。通过对含 WO<sub>3</sub> 渣系熔点的测定可发现,CaO 含量偏高,会提高含 WO<sub>3</sub> 渣

系的熔点,使渣流动性变差,降低 W 的收得率,因此采用低碱度渣工艺。

### 2.3 渣量控制

渣量过大会降低合金元素的收得率,因此充分利用白钨矿和氧化钼中的 CaO、SiO<sub>2</sub> 等氧化物和还原剂在还原过程中所产生的 SiO<sub>2</sub> 等形成炉渣,使渣量保持在较低的水平。

### 2.4 吹氧助熔

吹氧助熔能使渣中(FeO)含量过高,导致 [W] [Mo] 被氧化,氧化性强的渣对  $V_2O_5$  的还原不利;同时吹氧助熔消耗了钢液中的还原剂,不利于合金元素氧化物还原反应的进行。由于吹氧助熔降低了合金元素的收得率,因此对吹氧助熔进行控制,在熔化期尽可能选择晚吹氧,实现 W、Mo 氧化物的前期还原,而且吹氧强度不能过大,以避免由于渣量大而引起炉渣的泡沫化,导致大沸腾事故和流渣。

## 3 工业试验结果及讨论

### 3.1 W、Mo、V 合金元素的收得率

W、Mo、V 合金元素的收得率如表 3 所示。传统工艺生产高速钢合金化时的合金元素 W、Mo、V 收得率分别为 98%、98%、90%,而冶炼铁合金时的合金元素 W、Mo、V 收得率<sup>[5]</sup>分别为 97%、98%、98%,那么传统工艺生产高速钢时合金元素 W、Mo、V 综合收得率分别为 95%(98%×97%)、96%(98%×98%)、88.2%(90%×98%)。

表 3 W、Mo、V 合金元素的收得率/%  
Table 3 Yield of W, Mo, V alloying element /%

炉号	白钨矿			氧化钼			五氧化二钒		
	配入	实际	收得率	配入	实际	收得率	配入	实际	收得率
8873-2	6.14	5.87	95.60	5.00	4.94	98.80	1.82	1.70	93.41
8874-2	5.50	5.22	94.91	4.32	4.20	97.22	1.92	1.69	88.02
平均			95.25			98.01			90.72

### 3.2 冶炼时间和冶炼电耗

2 炉试验的冶炼时间平均为 283 min,冶炼电耗平均为 585 kWh/t。而重庆特钢用返回法冶炼高速钢的冶炼时间平均值为 230 min,冶炼电耗平均值为 480 kWh/t。直接合金化工艺的熔化期为 120 min,比返回法冶炼工艺长 5 min;氧化期为 35 min,与返回法冶炼工艺相当;还原期为 128 min,比返回法冶炼工艺长 48 min。但从整个生产高速

钢的流程来考虑,包括考虑上游的铁合金生产所消耗的电能和使用的的时间,则直接合金化工艺能节省时间和节约电能消耗。表 4 所示为综合考虑铁合金生产因素后,计算得到的传统工艺生产高速钢的综合冶炼时间和冶炼电耗。其计算方法是,为冶炼 20 t M2 钢,需要加入一定量的钨铁、钼铁、钒铁合金,生产这些铁合金的电耗以重点企业平均水平计算,铁合金冶炼时间用功率为 5 000 kVA 的矿热炉推算,将冶炼铁合金的时间和电耗也计算在生产高速钢的时间和电耗内,以便与直接合金化工艺从矿物到钢材的整个流程作对比分析。通过对比可以看出,直接合金化工艺节省冶炼时间 497 min,降低冶炼电耗 657 kWh/t,直接合金化工艺的冶炼时间只占传统工艺综合冶炼时间的 36.3%,冶炼能耗只占传统工艺综合冶炼能耗的 47.1%。

表 4 传统工艺生产高速钢的综合冶炼时间和冶炼电耗  
Table 4 Overall smelting time and electric power consumption of traditional technology for high speed steel melting

项目	冶炼时间/min	冶炼电耗/kWh·t <sup>-1</sup>
钨铁合金	155	215
钼铁合金	227	314
钒铁合金	168	233
电弧炉返回法冶炼	230	480
流程总计	780	1 242

### 3.3 钢材质量

#### 3.3.1 低倍组织与碳化物不均匀度

检验结果表明,采用氧化物矿直接合金化冶炼高速钢工艺所获得的 80 mm 方坯和 105 mm 圆坯的低倍组织,均达到 GB9943-88 中心疏松、一般疏松、偏析 ≤1 级的要求,按 ASTM A561 进行评定,其疏松、偏析 ≤3 级,也达到美国 ASTM A600 标准对低倍组织的要求。钢材的碳化物不均匀度完全达到 GB9943-88 的要求,中间坯的碳化物不均匀度完全达到企业内控标准,与奥地利 Bohler 公司 Isorapid 实物的致密度、碳化物不均匀度相当。

#### 3.3.2 非金属夹杂物评级

成品钢材的非金属夹杂物评级结果表明,未发现钢的 C、D 类夹杂物,A、B 类(粗、细系)夹杂物均 ≤2 级,完全达到 ASTM A561 标准,表明钢的冶炼及浇注工艺合理,钢的纯度高。

#### 3.3.3 钢中气体含量

钢中氧含量为  $55 \times 10^{-6}$ ,氮含量为  $154 \times$

$10^{-6}$ ,与铁合金冶炼 M2 高速钢的气体含量相当。

### 4 经济效益分析

每吨氧化物矿代替铁合金合金化所能节约的价值,节约价值用每吨氧化物矿所代替的铁合金的价格减去氧化物矿的价格来计算,可以计算得到本次工业试验使用氧化物矿合金化后吨钢节约价值为 7 000 元。考虑到直接合金化工艺比常规工艺冶炼时间延长,吨钢步骤费用增加,其冶炼电耗比常规工艺多,电费增加,最后可得:

熔融还原冶炼 M2 高速钢经济效益 = 吨钢合计节约价值 - 增加的步骤费用 - 增加的电费 =  $7\ 000 - 134 - (585 - 480) \times 0.5 = 6\ 813.5$  元/t。

### 5 结论

(1)全部采用白钨矿、氧化钼、 $V_2O_5$  代替钨铁、钼铁、钒铁冶炼 M2 高速钢合金化率达 13%,W 收得率达 95.25%,Mo 的收得率达 98.01%,V 的收得率达 90.72%。冶炼电耗 585 kWh/t,较铁合金冶炼 + 返回法冶炼的总能耗降低 657 kWh/t,冶炼时间 283 min 较铁合金冶炼 + 返回法冶炼两次冶炼时间缩短 497 min。

(2)直接合金化冶炼高速钢工艺所获得的钢材的低倍组织与碳化物不均匀度、非金属夹杂物评级、钢中气体含量均达到技术标准要求。

(3)直接合金化工艺较铁合金冶炼 M2 高速钢成本降低 6 813.5 元/t。

该课题为国家高技术研究发展基金(2003AA33X030)和国家自然科学基金(50374033)资助项目。

#### 参考文献

- 1 李金荣,毛杰.电炉炼钢钨、钼混合氧化物直接合金化.特殊钢,1997,(1):40
- 2 李正邦.熔融还原法冶炼高速钢.钢铁研究学报,2004,16(4):11
- 3 陈家祥.炼钢常用图表数据手册.北京:冶金工业出版社,1991.540
- 4 郭培民.白钨矿和氧化钼直接合金化冶炼合金钢的研究[博士学位论文].钢铁研究总院,2001.16
- 5 许传才.铁合金冶炼工艺学.西安:西北大学出版社,1994.225

周勇(1978-)男,博士研究生,2004年武汉科技大学硕士毕业,从事氧化物矿熔融还原冶炼工艺研究。