钒渣直接合金化的研究

黄正江

（攀枝花钢铁研究院）

本文介绍了电炉炼钢用钒渣合金化及平炉炼钢用钒渣球合金化的工艺。两种工艺钒的回收率分别为90%和75%。试验结果证明，钒渣直接合金化工艺对钢质量无影响。采用钒渣直接合金化冶炼含钒为0.1%的钢，可使钢成本降低约20元/t钢左右。

一、前言

钒能提高钢的强度、细化晶粒，消除钢的过热倾向，改善钢的赤热硬性、耐磨性及焊接性能。因此，钒是钢的合金化元素之一。

我国攀西地区蕴藏着丰富的钒钛磁铁矿资源，给我国发展含钒合金钢提供了有利条件。但合理的利用钒资源仍是重要的研究任务。

钒作为合金元素常以钒铁形式加入钢中。目前钒铁生产工序长、消耗大量化工原料，成本高，加入钢中后，钒的总回收率（从钒渣到钢的钒收率）只有67～75%。为了合理利用钒资源、降低含钒钢成本，我院从1975年开始研究“钒渣直接合金化”。先后同渡口矿务局煤炭机电修配厂、攀钢密地机修厂、乐山冶金机械轧辊厂、无锡钢铁厂，在1.5，5，10t电弧炉上进行试验。试验钢种有35MnMoVTi地质管用钢、ZG45MnVTi锚链轮用钢、ZGMn$_{13}$VTi的4m^{3}的铲齿、齿板和衬板，ZG50Mn$_2$VTi篦条。最大装入量为30t，共冶炼钢2253t，试验证明，在电弧炉中进行“钒渣直接合金化”是完全可行的。可冶炼含钒0.4%以下的含钒钢种，钒平均回收率达90%。

1984年，我院同重庆钢铁公司合作在50，90t平炉上，将钒渣和还原剂磨成粉剂制成球，在出钢过程直接合金化。冶炼了24Mn$_2$K，15MnVR，20MnSiVTi钢共706t，各种检验表明，钢的性能均达到国家标准。证明“钒渣直接合金化”在平炉上的应用是可行的。可冶炼含钒0.15%以下的钢种。钒平均回收率达75%。

二、试验条件

（一）设备条件

工业试验分别在变压器容量为1000，2250，4000，5500KVA的1.5，5，10t电弧炉（镁质炉衬，炉顶为水冷或高铝砖砌筑），以及50，90t平炉（镁砂炉衬，钢包为粘土砖砌筑，滑动水口浇铸连铸坯或镇静钢钢锭）中进行。

（二）钒渣的化学成分

1.电弧炉试验采用攀钢所生产的钒

渣，化学成分见表1〔1~4〕。

2.平炉试验采用钒渣球。将钒渣、硅铁、萤石经颚式破碎机粗破，球磨机磨至120目，按重量比(100:30:10)混合均匀，在园盘造球机上用比重为1.05～1.1g/cm³的水玻璃作粘结剂，造成φ10～30 mm的园球。钒渣球经自然干燥后的抗压强度为690N/cm²，球的化学成分见表2。

钒渣的化学成分（%） 表1

V_2O_5	TiO_2	MnO	SiO_2	Cr_2O_3	TFe	金属铁	备注
15.08～17.60	7.82～11.19	6.46～6.89	12.31～16.67	0.98～1.81	34.35～45.84	14.74～20.00	35MnMoVTi ZGMn13VTi
16.9～17.9	～	6.15～6.98	10.32～12.61	1.24～1.32	44.5～45.63	50～70	ZG50Mn2VTi ZG45Mn2Ti

钒渣球的化学成分（%） 表2

V_2O_5	FeO	TiO_2	MnO	CaO	SiO_2*	S	MFe
11.44	34.10	5.50	4.99	3.98	41.70	0.09	5.50

*SiO_2为配加硅铁粉氧化后的成分〔5〕

三、冶炼工艺

（一）电弧炉中采用钒渣直接合金化工艺

电弧炉采用钒渣直接合金化冶炼含钒钢的工艺如下：

氧化末期前仍为常规工艺操作，当氧化后期脱碳至比氧化末期高0.02%C时，扒出氧化渣，加入钒渣，并将造稀薄渣的渣料加完。渣形成后，加入碳粉、硅铁粉，石灰混合物还原。为保证脱硫，要求碱度控制在2.0～2.5。还原期一般在20～30min，钒回收率即可达到85%以上。其间可补加铁合金，同时补少量还原剂保持还原气氛。待温度满足出钢要求时即可出钢。

做了钒渣在还原期加入以及返回法冶炼采用钒渣合金化的试验，冶炼电耗和时间见表3。由表可知，氧化末期加入钒渣的方法，冶炼时间较短，吨钢电耗较低。

（二）平炉采用钒渣直接合金化工艺

平炉采用钒渣直接合金化，首先将钒渣球或粉剂置于炉头外烟道处干燥，出钢时加入钢包内，或随出钢过程加入。在重钢进行试验时，仍按钢种规定的温度出钢，浇铸情况良好〔5〕。为保证浇铸温度，可把出钢温度提高10℃。

（三）钒渣加入量的计算

钒渣加入量计算公式如下：

$$Q_{实}=\frac{〔V〕\times T}{0.56\times(V_2O_5)\times\eta_V\times(1-MFe)}$$

式中：$Q_{实}$——加入钒渣的实际重量，kg；

〔V〕——钢中钒含量，%；

(V_2O_5)——不含MFe的钒渣中V_2O_5含量，%；

0.56——V的换算系数，

η_V——钒的回收率，%；

钒渣合金化和钒铁合金化电耗、冶炼时间比较　　表3

钢种	冶炼周期 h, min	还原期 h, min	吨钢还原时间 min, s	电耗 度/t钢	备注
ZGMn$_{13}$VTi	3.0～5.13 3.40	0.40～1.48 1.6	16.15～29.33 21.3	561～833 697	20炉，氧化末加钒渣
	4.32～6.41 5.13	1.20～2.40 1.32	23.0～43.0 28.34	762～1030 896	9炉，还原期加钒渣
	2.0～2.10 2.3	0.55～1.45 1.16	18.23～26.0 21.3	539～734 604	3炉，返回法
	3.12～6.23 4.42	1.13～2.18 1.37	41.3～18.0 27.46	944～1048 817	10炉，加钒铁
35MnMoVTi	5.25～6.57 6.11	0.59～1.22 1.10	3.5～3.43 3.24	652～670 661	2炉，氧化末加钒渣，
	3.50～5.45 5.0	0.53～1.0 0.57	3.4～3.50 3.22	575～900 670	6炉，加钒铁
ZG45MnVTi	2.10～4.15 2.49	0.37～1.30 0.57	16.40～50.0 26.23	882～1688 1313	29炉（1.5t电弧炉冶炼），水冷炉盖，石灰石造渣，装入量有时少于1t，加钒渣
ZG45Mn	2.18～4.18 2.41	0.28～1.17 0.42	18.0～49.26 26.0	805～1755 1332	20炉，工艺同上，常规操作

MFe——钒渣中金属铁的重量百分数，%；

1－MFe——不含MFe的净钒渣的重量百分数，%。

要注意MFe的分析准确性：电弧炉冶炼时，η_V取88%；平炉冶炼低硅含钒钢时，η_V为70%；冶炼高硅含钒钢时为80%。

四、试验结果

（一）钒的回收率

在平炉和电弧炉中，采用钒渣直接合金化炼含钒钢时，钒的回收率见表4。由表可知，电弧炉中采用钒渣直接合金化，钒回收率平均可达90%，比用钒铁生产流程的回收率提高15%。平炉采用钒渣直接合金化，钒回收率平均可达75%，与钒铁生产流程回收率相近。

电弧炉冶炼时，渣中残留V_2O_5为0.028～0.78%；平炉冶炼时为0.55～0.85%。由此可见，电弧炉和平炉采用钒

钒回收率（%）　　表4

	电弧炉					平炉		
	ZGMn$_{13}$VTi		ZG45MnVTi	35MnMoVTi	ZG50Mn$_2$VTi	15MnVR	20MnSiV	24Mn$_2$K
	氧化法	返回法						
波动值	82.30～98.30	85.55～96.15	84.50～99.85	95.50和99	82.0～97.8	66.70～80.28	78.30～82.10	72.52～74.71
平均值	93.68	89.36	92.87		92.2	73.55	80.53	73.62

渣直接合金化炼钢时，反应较完全，冶炼效果良好[1~5]。

（二）钒渣直接合金化对钢质量的影响

钒渣直接合金化炼钢首先要考虑夹杂物。35MnMoVTi地质管用钢及15MnVR压力容器用钢质量要求较高，其电解夹杂、金相检验、钢中气体含量分析结果见表5。由表可知，电弧炉中采用钒渣直接合金化生产35MnMoVTi钢，夹杂物总量和分量均较低；钢中气体含量和夹杂物评级均低于钒铁合金化炼钢工艺。由此可见，电弧炉采用钒渣直接合金化，不会对钢的质量带来不良影响[4]。

钢中夹杂及气体成分分析　　表5

		电解夹杂，10^{-3}%					钢中气体 $\times10^{-3}$%		氧化物	硫化物	备注
		夹杂总量	SiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	氧含量	氮含量	评级	评级	
35MnMoVTi（电弧炉）		19.4～41.6 24.5	10.1～20.1 14.2	3.1～20.1 10.9	0.12～2.4 0.66	0.07～0.45 0.21	7.04～9.1 7.76	2.9～4.7 3.7	2.5	2.5	钒渣合金化（2炉）
							4.2～10 8.2	4.8～3.7 4.3	3	2.8	钒铁合金化（3炉）
15MnVR（平炉）	锭头	13～18 15.3	1.33～2.24 1.7	4.35～4.78 4.48	1.48～4.11 2.97	0.082～0.43 0.28	2.4～5.88 3.9	1.7～5 3.46	1～2	2～4	钒渣合金化（5炉）
	锭尾	12～19 16.8	1.1～2.36 1.6	4.5～6.3 5.6	0.59～2.5 1.47	0.19～0.47 0.32	2.6～5.5 3.8	3～5.9 3.9	1～3	2～4	钒渣合金化（5炉）
	锭头	11～15 13	1.23～1.45 1.34	3.9～5.9 4.9	2.18～5.4 3.8	0.17	3.2～5.0 3.7	3.9～5.2 4.1	1～3	2～4	钒铁合金化（1炉）
	锭尾	15	1.23	5.8	1.83	0.22	3.1～3.3 3.28	3.4～4.1 3.7	1	2	一炉锭尾评级，钒铁合金化

平炉采用钒渣直接合金化炼钢，分别从锭头、锭尾取样，其电解夹杂总量略有增加，但是差别不显著。夹杂物评级均在同等级别范围内。说明钒渣合金化不增加夹杂，钢中气体含量也不增加。为进一步检查夹杂物存在形态，采用SEM505扫描电镜和EDAXG9100能谱仪对15MnVR钢的夹杂进行半定量分析。结果表明，钒渣直接合金化时，夹杂主要是硅酸盐和硫化锰，没有钒渣成分。钒铁合金化时，夹杂主要是铝、铁硅酸盐、氧化铁以及硫化铁和硫化锰夹杂，并存在钒的夹杂物。同时还作了低倍检查和硫印检查[2,4,6]，结果表明，对钢质量无影响。表6是钒渣直接合金化和钒铁合金化时钢的机械性能。由表可知，钒渣直接合金化对钢的机械性能无影响，均在允许范围内波动。15MnVR压力容器用钢超声波探伤检查表明，一级品合格率为99.93%。

五、钒渣直接合金化的经济效益

采用钒渣直接合金化冶炼工艺，可简化钒铁生产流程，节省大量化工原材料，

钢 的 机 械 性 能 比 较　　表6

钢　种	规　格 mm	σs,N/mm²	σb,N/mm²	δ₅,%	α_k,J/cm²	α_k,J/cm² −40℃	冷　弯 180° α=3a	备　注
15MnVR	12～20	390～440 413.4	540～590 564	25～30 27.4	65～126 99.9	44～78 55.4	合	加钒渣
15MnVR	12～27	390～530 466.7	530～700 638.9	16～32 23.23	48～97 68.8	8～62 43.7		加钒铁
20MnSiVTi	φ28	413	570～589 576	21.9～28.6 25.23	无	90°冷弯 α=3a好	合	加钒渣
35MnMoVTi	φ88×5.5	90.5	105.5	13.5	〃	HB328		加钒渣
35MnMoVTi	φ87×5.0	86.5	98.5	13.5	〃	332		加钒铁
ZG45MnVTi	铸　件	707	881	12.1	32	280		加钒渣
ZG45MnVTi	〃	659	828	16	31.8	／		加钒铁

减少铝耗。并可提高总回收率达5～15%。

钒渣直接合金化冶炼比401钒铁冶炼的成本低。平炉冶炼15MnVR钢时，降低成本为12元/t钢。电弧炉冶炼35MnMoVTi钢时，降低成本为24元/t钢；ZG45MnVTi钢为39元/t钢；ZGMn$_{13}$VTi钢为84元/t钢。总之，冶炼含钒为0.1%的钢，降低成本约20元/t钢，有显著的经济效益。

六、结　论

1.钒渣直接合金化工艺简单易行、易推广。在平、转炉中采用时，随出钢加入即可完成；在电弧炉中利用还原期的还原气氛就可实现合金化，不增加冶炼时间和电耗。

2.钒渣直接合金化生产的钢，经取样进行电解、金相、电镜扫描、机械性能、气体分析等检查，证明对钢的质量无影响。

3.钒渣直接合金化代替钒铁合金化可减少钒铁生产量，可降低生产成本。

4.在平、转炉中冶炼低硅含钒钢，钒的回收率达75%；电弧炉中冶炼时，钒回收率达90%，比钒铁合金化时提高15%。

参 考 文 献

〔1〕乐山冶金机械轧辊厂、攀枝花钢铁研究院，钒渣直接合金化—电弧炉应用钒渣直接合金化冶炼钒钛高锰钢（内部资料），1984、12、30

〔2〕渡口矿务局煤炭机修厂、攀枝花钢铁研究院，钒渣直接合金化—采用钒渣直接合金化冶炼ZG45MnVTi钢（内部资料），1984，12，30

〔3〕攀枝花钢铁公司机修厂、攀枝花钢铁研究院，钒渣直接合金化试验初步总结(内部资料)，1984，12，30

〔4〕江苏无锡钢铁厂、攀枝花钢铁研究院、钒渣直接合金化冶炼35MnMoVTi钢在电弧炉上的实践（内部资料），1985年元月

〔5〕重庆钢铁公司、攀枝花钢铁研究院，钒渣直接合金化—平炉采用钒渣直接合金化冶炼工艺总结（内部资料），1984，12，30

〔6〕重庆钢铁公司、攀枝花钢铁研究院，钒渣直接合金化—钒渣直接合金化对平炉钢质量影响（内部资料），1984，12，30