雾　化　提　钒

沈润华　钱家澍　寿煜庭

（攀枝花钢铁公司、攀枝花钢铁研究院）

本文为攀枝花钢铁公司进行雾化提钒试验和生产的技术总结，简述了雾化提钒工艺流程；主要设备和技术经济指标；提出雾化提钒的特点：反应速度快、去钒保碳效果好和钒渣杂质少。认为雾化提钒具有设备简单、投资省、操作容易和易实现生产连续化等优点，是一种可供大规模工业提钒选择的新工艺。

迄今为止国内外钒制品的原料，主要是从钒钛磁铁矿中提取。从钒钛磁铁矿中提取钒的方法可分为：火法（间接法）和湿法（直接法），而火法（即从含钒铁水中提钒）是主要提钒的方法之一。从50年代到70年代国内外火法提钒主要有：承钢和马钢的空气侧吹转炉法、马钢槽式炉法、苏联下塔吉尔冶金公司的氧气顶吹转炉法（此法在首钢也进行过试验）和南非海威尔德钢与钒公司的震动罐法。上述各类吹钒方法，各有其优缺点。为了寻求一种更切合攀钢实际的提钒新工艺，从70年攀钢开始出铁后，就提出了雾化法提钒的设想。1971 年 2 月，攀钢建成了第一座每小时处理铁水 60 吨的雾化提钒试验炉并开始进行雾化提钒的工业性试验，先后进行三种炉型的试验[1]。经过几年的试验和生产实践，于1978 年 12 月建成年产钒渣 8.6～8.9 万吨的提钒生产车间，成为我国生产钒渣的主要方法之一。

一、雾化提钒的工艺流程和主要设备

雾化提钒的简单工艺流程（见图1）：含钒铁水兑入中间罐，流经中间罐底部水口，进入雾化室，与雾化器喷出的高速气流相遇，被粉碎成细小铁珠，反应表面积迅速扩大，造成良好的元素氧化动力学条件，铁水中部份钒及其它易氧化的元素随即氧化，形成熔渣，半钢和熔渣经流槽进

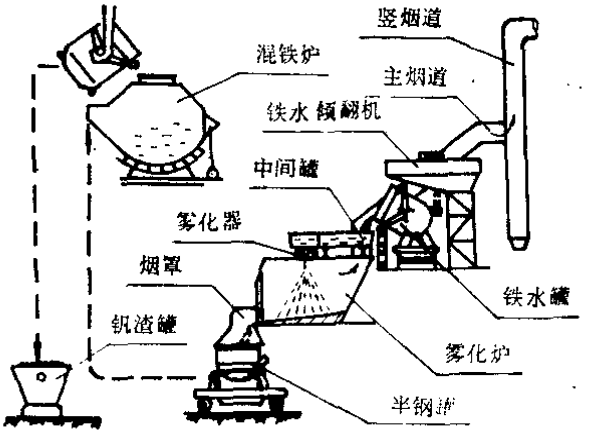


图 1　雾化提钒流程示意图

入半钢罐，钒渣和半钢在罐内分离，先倒出半钢送转炉炼钢、然后翻出钒渣。

雾化提钒的关键设备是雾化器。雾化器设计是否合理不仅直接影响氧化率、半钢温度、雾化能力和吹损等技术经济指标也直接影响炉令和操作。为此，曾进行过几种类型的雾化器冷态模拟试验[2]。

雾化效果，即铁水流股被压缩空气打碎的程度，是一个重要参数。通过模拟实验，对两排孔型雾化器风咀夹角 α 与平均雾化粒度 $d_{平}$ 有如下关系：

$$d_{平}=0.003\frac{U_V^{0.25}}{U_L^{1.25}}\cdot\frac{\delta}{\rho}\cdot\frac{\sqrt{gH}\cdot D_{当}}{\left(\frac{p+1}{Po}\right)^{\frac{2(k-1)}{k}}\left[\left(\frac{P+1}{Po}\right)^{\frac{k-1}{k}}-1\right]\sin\frac{\alpha}{2}}$$

式中：U_V—液体的运动粘度

U_L—介质的运动粘度

$D_{当}$—液流(水口)的当量直径

δ—液体表面张力

ρ—介质的密度

k—介质的绝热指数

H—液面高度

g—重力加速度

P_0—大气压力

P—雾化器前压缩空气压力（表压）

由上式可知：在其它条件一定情况下，平均雾化粒度 $d_{平}$ 随雾化器风咀夹角 α 的增大而减小。实验又表明：风咀中心线的几何交点到雾化器底面距离 h 随雾化器风咀夹角 α 的增大，轴心速度和静压头（雾化气中心线上速度和静压力）的变化规律基本上不变，而交点随 α 增大而向雾化器方向移动（表1）（图2）。从而使反溅加剧。生产实践表明：在相反风压、风量和水口条件下，交角 α 增大时雾化效果好，钒氧化率和半钢温度高，但反溅严重，炉墙结铁；α 减小虽不反溅，但雾化效果差，炉底冲刷严重。因此，必须选择合适的夹角。

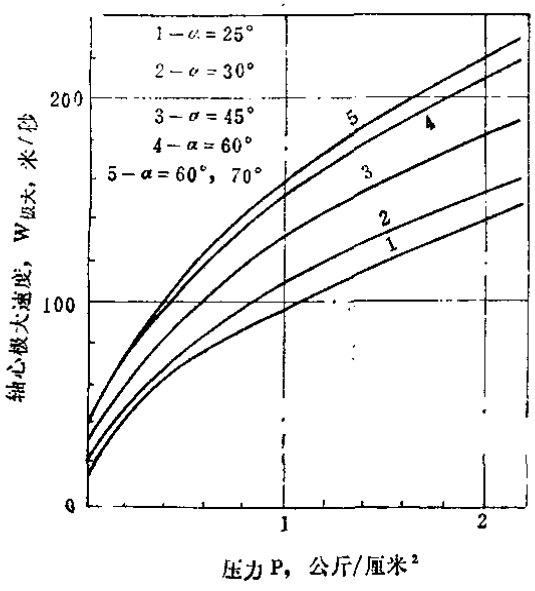


图 2 轴心速度极大值与压力的关系

模拟实验还表明：在两排气流相遇处，虽然出现正压区（静压头大于大气压），但在喷出口附近由于高速气流的喷出形成负压，经雾化器流铁口吸入大量冷空气，吸入量 Q 随着供风量的增加而增加，但与雾化器喷出孔交角 α 关系不大，相对吸风量平均为供风量的 62%。另外，喷出口气流相遇后组成的合成气流的扩张角在平行和垂直于两排喷出口方向分别为 14° 和 18° 左右。

在雾化器夹角 α 一定时，雾化器的风眼带长 L 必须与水口尺寸相适应；风咀中心线几何交点距雾化器底面的距离 h 也必须考虑合适。

雾化室是铁水雾化和氧化反应的空间，雾化室设计是否合理直接影响各项吹钒指标，而且在很大程度上决定了炉子寿命和生产能力。试验以来曾进行了三种炉

雾化器轴心速度和静压极大、极小值　　表 1

喷出孔交角 α 度	供风量 Vg 米³/小时	压缩空气压力 P 公斤/厘米²	轴心气流极大速度 $W_{极大}$ 米/秒	$W_{极大}$ 距喷出口垂直距离 毫米	轴心静压头 $P_{轴}$ 毫米水柱 极大值	轴心静压头 $P_{轴}$ 毫米水柱 极小值	$P_{静}=0$时与喷出口垂直距离，毫米
25	60	0.07	39	100	17.3	—2.4	105
〃	80	0.25	55.5	〃	31.8	—4.8	〃
〃	100	0.62	76.7	〃	55.2	—9.2	〃
〃	120	1.25	103.7	〃	103.8	—17.0	〃
30	60	0.08	43.4	90			100
〃	80	0.25	61.4	〃			〃
〃	100	0.62	86.9	〃			〃
〃	120	1.20	123.4	〃			〃
45	60	0.07	46.9	80			85
〃	80	0.20	64.0	〃			〃
〃	100	0.67	87.2	〃			〃
〃	120	1.25	128.7	〃			〃
60	60	0.07	54.0	55			70
〃	80	0.25	76.5	〃			〃
〃	100	0.62	106.2	〃			〃
〃	120	1.20	192.5	〃			〃

型的试验，对炉形、炉体几何尺寸和炉衬材料等方面做了大量工作，使炉令大幅度提高，最高的超过 5 千炉，一般均在两千炉以上。

二、雾化提钒的主要参数与指标

1. 吹损率

曾连续测定 53 罐 4572 吨提钒铁水的吹损[3]，得雾化提钒的液体半钢收得率为 93.92%，即吹损为 6.08%。表 2 为收集到的国内外几种提钒方法的吹损情况，可见用富氧空气进行雾化提钒的吹损，并不高于其它方法。

2. 钒氧化率

任何一种吹钒工艺都力求得到高的钒

国内外几种提钒方法的吹损率　　表 2

生产厂	设备	吹损率，%	数据来源
下塔吉尔	100 吨氧气顶吹转炉	5.0～8.0	[4]
丘索夫	19～22 吨空气底吹转炉	8.0～10.0	[5]
马钢	20 吨空气侧吹转炉	12.2～10.4	[6]
首钢试验	3 吨氧气顶吹转炉	7.02	[7]
海威尔德	60 吨摇动罐	7.0	[8]

氧化率。对于雾化提钒而言，影响钒氧化率的主要因素有：雾化器参数、单位供风量、供风压力和富氧程度等。通过几年实践，又对生产数据进行数理统计分析，钒氧化率可达90%以上。应该指出：对于攀钢铁水条件吹钒的理论供风量为108标米^3/吨铁。而实际供风远小于理论供风量，说明模拟实验指出的：由于负压，吸风量为供风量的62%，这一结果是正确的。

3. 钒回收率

钒回收率的高低决定于钒氧化率、渣铁分离条件、管理水平和操作水平等。攀钢雾化提钒从试验到建成车间投产，钒的总收率是偏低的，一般只有70%左右，79年四季度平均为76.55%。应当指出，攀钢雾化提钒，钒的总回收率低，并不是方法本身固有的缺陷，主要是在渣铁分离时，由于挡渣设备不当，使相当一部分钒渣随半钢流走了；加之，由于供风量和铁水流量缺乏自动联锁控制手段，使钒的氧化率不稳定等。目前正采取相应的措施，预计这些措施上去以后，把钒的总收率提高到85%以上是完全可能的。

三、雾化提钒的特点

通过几年来的生产实践，与其它提钒方法相比有以下特点：

1. 反应速度快

雾化提钒的反应过程是铁水经中间罐底部水口以一定形状流入雾化室，在雾化室内与雾化器喷出的高速气流相遇，被粉碎成细小铁珠使反应表面积增加几十万倍。这些小铁珠相当于各自形成一个独立的小熔池，与周围空气中的氧造成良好的反应动力学条件，小熔池表面诸元素迅速被氧化，根据热力学可以认为，诸元素的氧化程度与铁珠表面的诸元素的浓度成一定比例。随着小铁珠的下落过程，一方面因为[O]向内部扩散，使内部诸元素被氧化；另一方面因整个雾化室内为氧化气氛，故使表面氧化反应继续进行，这样使小铁珠变为渣铁混合的熔池。曾在试验炉条件下收集不同高度的小铁珠，测定钒的氧化情况，由表3可知：空间钒的氧化反应占整个过程的将近40%。

雾化室内不同高度钒的氧化情况 表3

高度，米	0	1.5	2.0	2.5	3.5
[V]，%	0.415	0.29	0.275	0.265	0.260
钒氧化率，%	0	30.12	33.37	36.14	37.35

随着小铁珠落至雾化室底部，与渣铁一起流入半钢罐内。在从炉底流入半钢罐过程和半钢罐内渣铁分离的整个过程中，由于熔渣内有较高的（FeO），故靠氧化铁供氧使氧化反应继续进行，在这一阶段按元素的氧化顺序Ti—Si—V—Mn—C进行反应。曾分别在半钢流槽和半钢罐内取样，由表4可知：大约60%的钒是在雾化室内氧化的，而半钢罐内钒的氧化占整个钒氧化的40%左右；C在罐内的烧损占整个烧损的40～80%。这充分说明上述反应过程的推测是正确的。

根据上述对雾化提钒氧化过程的描述，可以看出，由于雾化，使反应表面积扩大，故反应速度高于其它方法。

2. 去钒保碳效果好

所有铁水提钒工艺都力求将铁水中的钒尽可能多氧化，而铁水中碳不被大量烧损，以使在炼钢时有足够的热源。为达到这一目的，从热力学角度用ΔF°（自由能）或Po_2（氧的分解压）来判断。从有关元素氧化物的ΔF°—T图（图3）可知：ΔFv—T和ΔFc—T两线有一交点，习惯

炉内和罐内C和V的氧化情况　　表4

炉号 \ 指标 \ 项目	C，%			C烧损率，%			V，%			V氧化率，%		
	铁水	半钢 炉内	半钢 罐内	炉内	罐内	总计	铁水	半钢 炉内	半钢 罐内	炉内	罐内	总计
2146	4.10	3.98	3.65	2.93	8.05	10.98	0.38	0.168	0.060	56.3	27.8	84.2
2147	〃	3.95	3.65	3.66	7.32	10.98	0.40	0.190	0.070	51.9	30.4	82.3
2148	〃	3.60	3.28	12.20	7.80	20.00	0.42	0.179	0.078	57.2	24.0	81.2
2149	〃	3.58	3.00	10.68	14.15	26.83	0.39	0.254	0.088	34.7	42.7	77.4
平均	〃	3.78	3.39	7.78	9.33	17.20	0.40	0.198	0.074	50.15	31.2	81.38

上称为转化温度$T_{转}$。当吹钒过程温度低于$T_{转}$时，钒先于碳被氧化；当高于$T_{转}$时，碳先于钒被氧化。所以为了达到去钒保碳的目的，要求吹钒过程温度控制在$T_{转}$以下。文献[1]计算时，攀钢铁水条件$T_{转}$为1357℃。为了控制吹钒过程温度不高于$T_{转}$，对一般吹钒工艺均需在过程中加入冷却剂，仍要烧损较大量的碳（见表5）。

对于雾化提钒，虽然在吹钒过程中没有加入冷却剂，但是能较好地达到去钒保碳的目的，分析其原因：

(1) 因为雾化提钒采用30～35%的富氧压缩空气，带入大量氮气能起到冷却剂作用，使反应温度控制较低。而氧气顶吹转炉氧枪附近区域形成高温区，使碳大量烧损。

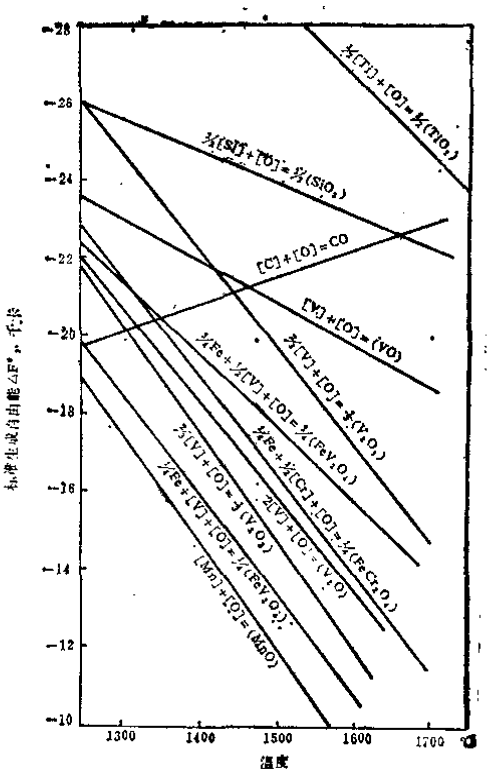


图3　△F°—T关系图

各种吹钒方法半钢成分　　表5

厂名	方法	半钢成分，% C	半钢成分，% V	时间
首钢	氧气顶吹转炉	3.27	0.055	65年
攀钢	氧气顶吹转炉	3.50	0.074	73年
下塔吉尔	氧气顶吹转炉	2.4～3.4	0.02～0.04	
马钢	空气侧吹转炉	3.08	0.06	65. 12月
承钢	空气侧吹转炉	3.24	0.044	66. 12月
马钢	槽式炉	3.17	0.039	70. 4月
海威尔德	震动罐	3.17	0.07	
攀钢	雾化炉	3.92	0.061	79年下半年

（2）雾化提钒在雾化室内无熔池，反应所产生的热量，不断被废气和半钢带走，故不能使雾化室内的温度急剧上升。

（3）小铁珠在空间反应时，铁液中碳氧化产生CO，文献[9]指出：CO析出的压力是随铁珠直径减小的程度而上升，使铁滴中的脱碳反应受到抑制。

由于雾化提钒所得的半钢含碳量高于其它提钒方法，故在氧气顶吹转炉中能比较顺利的炼成各种牌号的钢。77年9月曾用全半钢炼6炉重轨钢和比例超过80%的混合铁水吹炼18炉重轨钢，在正常操作条件下，均不需添加提温剂。铁水与半钢炼钢的脱S效率、吹氧时间和造渣材料消耗情况比较见表6、表7。

铁水和半钢炼钢的脱S效率比较　　表6

	脱S效率，%	S分配比，(S)/[S]	统计炉数
铁　水	47.11	11.98	44
半　钢	46.87	10.21	30

吹氧时间和造渣材料消耗　　表7

	统计炉数	平均吹氧时间	渣料消耗，公斤/吨
铁　　水	117	23′14″	93.8
半钢铁水混合（半钢80%）	142	20′38″	73.9
半　　钢	15	20′30″	66.2

3. 空间反应钒渣杂质少

表8为攀钢几年来用雾化法生产的钒渣平均成份

钒　渣　成　分　　表8

时间，年	成份，%				
	V_2O_5	SiO_2	CaO	P	MFe
1974	18.15	13.33	0.61	0.034	25.50
1975	16.80	14.72	0.58	0.024	19.55
1976	17.30	14.40	0.64	0.023	21.40
1977	17.05	14.90	0.74	0.023	22.47
1978	18.11	14.57	0.49	0.0193	18.21
1979	17.88	13.64	0.577	0.0495	17.70

表9为收集到的国内外生产的钒渣成份。

由表可知：攀钢用雾化法生产的钒渣质量较好，特别是有害杂质CaO、MgO，Al_2O_3和P均较低。其原因除与铁水成分有关外，还因雾化法与其它提钒工艺有下列区别：(1)由于空间反应和在反应室内无熔池，减少了耐火材料对钒渣的沾污；(2)由于中间罐内设有挡渣隔墙，避免了高CaO的高炉渣进入雾化室。

钒　渣　成　分　　表 9

来源＼成份%	V_2O_5	TFe	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	MFe	P	数据来源
攀　钢	22.88	35.72	0.344	0.38	10.69	0.92	19.87	0.057	*
南　非	27.80	22.40 (FeO)	0.50	0.3	17.30	3.50	13.00		[8]
	25.40	26.03	4.65	2.22	14.80	5.22		0.02	**
下塔吉尔	16—19	39—47	<1.5		17—20		10—15	<0.2 (P_2O_5)	[11]
承　德	15—19	40—45.5	1.5—2.3	1.5	12.5—14.5		19	0.02—0.08	[10]

* 为80年4—5月份60炉分析结果　　** 由锦州铁合金厂化验

曾对雾化法所生产的钒渣进行岩相分析[12]，钒渣的矿物及含量见表10。

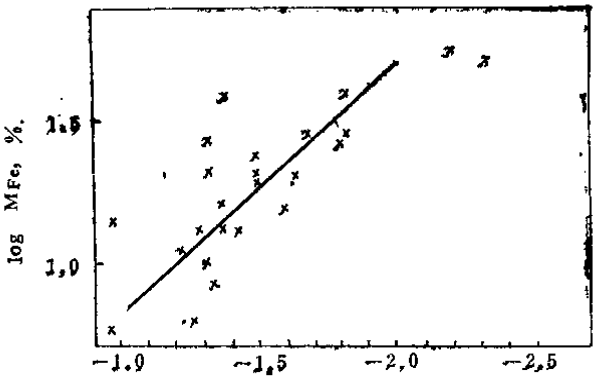
钒渣的矿物组成　　表 10

矿物成份	钒铁晶石	磁铁矿	钒榄榄石	金属铁*
%	49	9	31	11

*金属铁不包括选出2毫米以上的珠铁。

峨嵋综合所岩相分析认为：一般钒渣中钒以钒尖晶石（$FeO\cdot V_2O_3$）形式存在。而雾化法以钒铁晶石（$2FeO\cdot VO_2$）形式存在。若按体积百分比计，雾化法钒渣中钒铁晶石占70～75%，晶粒大小为40μ左右，最大可为90～100μ，并且无游离石英相，这对从钒渣中提取V_2O_5的工序来说，有利于转变为可熔性钒。

雾化钒渣中MFe虽然随着操作的加强，有所下降，然而仍应该认为是偏高的。MFe偏高除与工艺、操作有关外，还与铁水成分有关，攀钢79年提钒所用的铁水[Si]为0.13%（部分炉次铁水中的Si为微量），使生产的钒渣相应SiO_2偏低，文献[13]指出：钒渣中绝大部分钒都浸入钒尖晶石，尖晶石矿物在硅酸盐熔体中的溶解度极小，当硅酸盐相组分的相对量小时，钒渣粘度大，甚至为干散状的颗粒，这种钒渣中不可分离的散状金属铁量显著增加。图4为雾化法生产钒渣中MFe与铁水含硅量的关系。



$\log MFe = -0.0597 - 0.889 \cdot 2\log Si$

$r = 10.821 > r_n = 24,1\% = 0.515$

图 4　钒渣 MFe—SiO_2 关系

四、评价和展望

攀钢的雾化提钒，从建成第一号试验炉试验开始，就显示了它的强大生命力。主要表现在：

1. 设备简单

除风机和起重设备外，炉体都是钢结构，没有任何精密设备，一般钢铁企业都可以自己制造。

2. 投资省，建设快

攀钢一、二号试验炉，都是利用现有厂房。建设一号试验炉（每小时处理铁水60吨）总计只花了十多万元，建设二号试验炉也只花了卅多万元（每小时处理铁水180～300吨），从设计到建成投产，只花了三个月。

3. 操作简单，劳动生产率高，容易实现生产连续化

生产能力可根据需要作大幅度调整（改变中间罐水口、改变供风量即可），目前每小时处理铁水量250～300吨，还可提高到500吨以上；如果铁水供应充足，可实现生产连续化。

由于采用了雾化提钒，给攀钢带来的直接经济效果是：

可以更充分利用攀钢钒资源，含钒铁水可以全部提钒后再炼钢；解放了转炉生产能力，为攀钢钢产量从原设计的150万吨提高到300万吨创造了条件。

由于改变了原设计用转炉双联提钒的工艺流程，有利于生产组织调度。

雾化提钒是一项新技术，问世时间不长，还不完善，需要做大量的改进工作。十年的实践表明：毫无疑问，它是一种可供选择的、有一定竞争能力的提钒新方法。

攀钢十年来雾化提钒的实践为世界冶金工作者多年来所曾设想过的雾化冶金展示了广阔的前景—从雾化提钒到雾化炼钢，逐步实现炼钢过程的连续化，将可能使整个钢铁生产过程连续化。

参 考 文 献

[1] 《雾化提钒总结》，攀钢提钒炼钢厂等，（内部资料），1977.11.

[2] 《金属雾化模拟实验》，攀枝花钢铁研究院等，1973.7.

[3] 《攀钢雾化提钒吹损的试验测定》，攀钢提钒炼钢厂等，1976.

[4] 《Проблемы ванадия в черной металлургия》, Том5, 1966, P5～15.

[5] 《Проблемы ванадия в черной металлургия》, Том5, 1966, P117～130.

[6] 《吹钒理论与实践》，攀枝花钢铁研究院.

[7] 《3吨氧气顶吹转炉吹炼含钒生铁的热平衡》，石景山钢铁公司，（内部资料）1965.

[8] Journal of the Iron and steel, institute. 1970. 4, P336～341.

[9] ИЗВ ВУЗ Черная металлургия, 1978, №.5 44～55.

[10] 《我厂钒铁生产概况》，锦州铁合金厂，1980.3.

[11] 《钢铁钒钛》，1980年，第二、三期.

[12] 《攀枝花铁矿中有益元素及其在生产过程中的分布和赋存状态的研究》，峨眉矿产综合利用研究所等，1976.1.

[13] 《钒冶金原理》，А·Ю·波良可夫，饶渡崎译，中国工业出版社.