

铁道部科学研究院 论文集

铁道材料及工艺专辑

3

1979

目 录

1. 等离子弧熔炼	(1)
2. 大功率柴油机球铁曲轴铁模挂砂铸造	(14)
3. 活塞环径向压力分布与工艺因素	(31)
4. 牵引齿轮付动态接触与偏载补偿的研究	(39)
5. 等离子体喷涂钼基合金涂层对改善熔着磨损性能的研究	(53)
6. GCr 15Si Mn 钢真空淬火的研究	(73)
7. 红外线碳势自动控制甲醇—煤油滴注剂可控渗碳机理的初步探讨	(85)
8. 前进型机车主动轴横向裂纹研究	(100)
9. 无缝线路长钢轨焊接及其发展	(115)
10. 车轴小角度纵波探伤法和裂纹深度的测量	(126)
11. 60公里/小时 超声波钢轨探伤车模拟试验	(136)
12. 廿年油漆曝晒试验指出新的研究方向	(142)
13. 氟硼酸根离子选择性电极测定钢铁中的硼	(149)
14. 用DM-1 浆材进行隧道堵水的研究	(157)
15. 板式轨道沥青水泥砂浆道床	(169)
16. 提高逆导晶闸管换流能力的探讨	(178)
17. 关于降低集成电路前置放大器噪声的探讨与实践	(186)
18. 合成摩擦材料的弹性模量对车轮热影响的研究	(197)
19. 采用云母氧化铁颜料延长钢梁面漆使用寿命的研究	(208)
20. 我国铁路合成闸瓦的发展问题	(220)
21. 气体原料制备吸热型气氛控制的试验研究 《吸热型气氛的控制》之一	(230)
22. 井式炉滴入法渗碳过程的碳势控制试验研究 《吸热型气氛的控制》之二	(239)

等 离 子 弧 熔 炼

戚墅堰机车车辆工艺研究所

张 吉 祥

一、前 言

等离子弧熔炼金属的方法，是国外60年代初试验研究成功的。现已获得很快的发展，并在冶金、铸造工艺上得到生产应用，是近年来很受注目的一种新熔炼方法。

苏联和东德在这方面取得的成绩很大，他们合搞的容量为10吨和30吨的等离子炉，分别在1974年和1977年试制成功，并正式投产，现在又设计了一座100吨等离子炉。这是几年前被认为不可能的事实。由于等离子炉的试制成功把冶金学引入了一个新阶段。

我所自1969年开始试验研究等离子炉，先后试制成功容量为6公斤，10公斤，30公斤，50公斤，150公斤的等离子炉。并在上述炉中熔炼了铝合金、铜合金、紫铜、钼钛合金、高铬耐磨铸铁、铬钼铜合金铸铁、上焊69、钴铬钨合金、钼铁、高铬耐热钢 GH302、3H572及其它各种合金钢等几十个品种。并浇出了形状复杂、很薄的多种精密铸件，并在150公斤炉上进行了用废钢和造渣熔炼工艺试验。经近千炉次的生产实践，证实这种熔炼方法具有很多优点，是符合多、快、好、省的一种新熔炼方法。

一九七二年铁道部委托我所召开了全国性等离子熔炼技术座谈会，对该项技术进行鉴定得到肯定。以后在一些工厂和高等院校、研究院、研究所得到推广应用，受到了一定的重视。

这项技术由于“四人帮”的干扰破坏，以及人们对等离子弧热源缺少认识，总的来讲在我国发展不快，多年来还处于现有水平，与国外差距拉大了。为了发展等离子熔炼技术，促使等离子炉尽快应用到我国冶金工业和铸造工业上，为实现四个现代化作出贡献，我所正在试验研究新型大功率喷枪，并将该热源应用于铁的连续熔化，为改变铸铁车间落后面貌，攀登铸铁熔炼新高峰，闯出我国自己发展的道路而努力。

二、等离子熔炼基本原理和等离子电弧的产生及其特性介绍

等离子熔炼是应用温度高达3万度以上的等离子体电弧作热源，在一个封闭的等离子炉内熔炼金属的方法。

等离子体电弧是通过等离子喷枪的钨钨极（阴极）和喷枪水冷喷头（辅助阳极），接上

直流电源，通入较高电压，经过高频振荡器的激发，形成直流电弧由喷口喷出。并将通过喷口的工作气体(氩气)电离。钨钨极发出的电子高速飞向阳极，途中不断激发和电离气体的分子和原子，同时经过“热电离”“碰撞电离”“强光电离”使气体充分电离，这种形成的离子流(电弧)，经过喷枪口的“机械压缩”“磁收缩效应”“热收缩效应”的作用后，以很高的速度从喷枪口喷出，这种高度电离，高度压缩的非转移电弧再与炉料(主阳极)接通，形成电气回路。通入大电流这样就使喷枪钨钨阴极和炉料间产生大功率的等离子转移电弧来快速熔化金属。

由于等离子体电弧是将工作气体(氩气)充分电离，取得很大的能量，当氩离子和电子复合时，就将这些能量释放出来，通过高度压缩，使弧柱半径缩小，增加了弧柱中的电荷数，使能量高度集中，导致弧温自动升高。故在相同功率的情况下，等离子弧的温度，要比普通自由电弧温度高10倍左右。

由于等离子体电弧，通过喷枪口喷出，导致气流速度增加，其传热率比自由电弧高3.6倍左右，等离子电弧的有效功率(传热给被熔化金属的功率)比自由电弧约大40%，其有效功率随电流呈线性增加，并与工作气体的成分、耗量、和弧长有关。

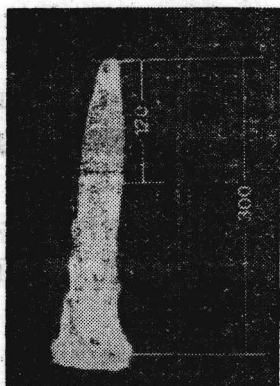
现将有关特性介绍如下：

1. 照片一为典型的与熔池相垂直的氩弧。

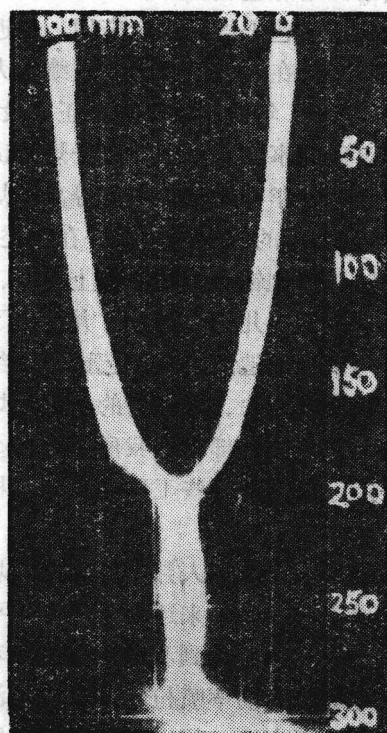
弧长： $L_B = 300$ 毫米

弧电流： $I_B = 2$ 千安

工作气体为氩气流量为4米³/小时。



照片一



照片二

2. 照片二为喷枪平行排列时，两个等离子弧的相互影响，喷枪间距为100毫米。

3. 图一为以弧长为函数时，熔池内实际输入功率。

弧电流： $I_B = 2$ 千安

工作气体：氩气

流量：4~6.3米³/时

4. 图二为等离子氩弧整个轴向变化的温度场。

弧 长: $L_B = 400$ 毫米

弧 电 流: $I_B = 1500$ 安

氩气流量: $3 \text{ 米}^3/\text{时}$

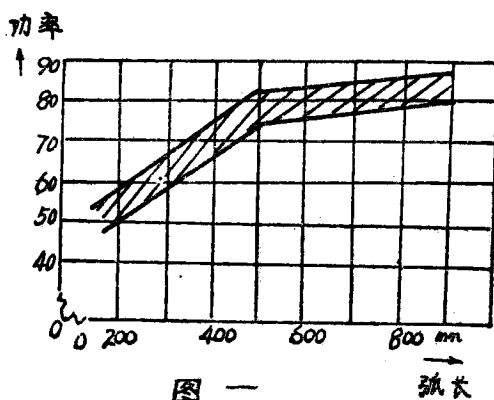
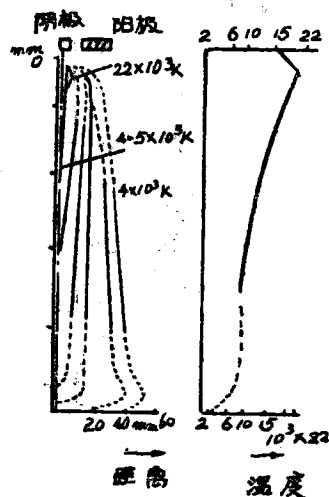


图 一



图二

5. 图三为以离开阴极的距离为函数时, 不同弧长的相对辐射功率。

弧 电 流: $I_B = 1.5$ 千安

弧 长: $L_B = 200 \sim 500$ 毫米。

工作气体: 氩气。

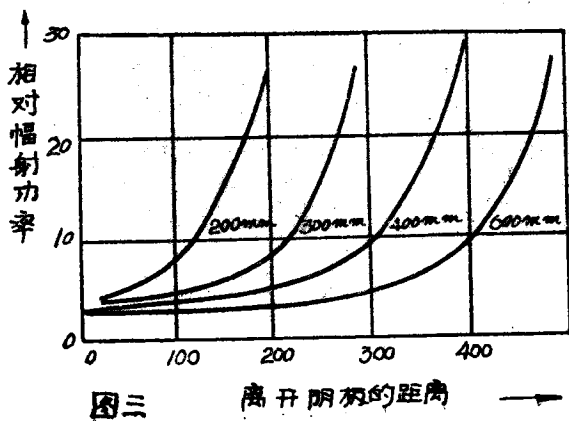
6. 图四为以离开阴极的距离为函数时, 弧长相同, 而电流不同的相对辐射功率。

弧 长: $L_B = 300$ 毫米

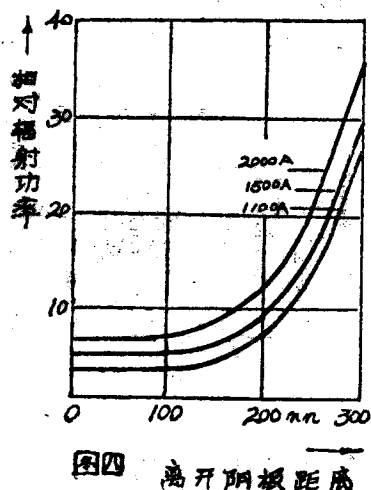
弧 电 流: $I_B = 1.1 \sim 2.0$ 千安

工作气体: 氩气

流 量: $N = 4 \text{ 米}^3/\text{小时}$



图三



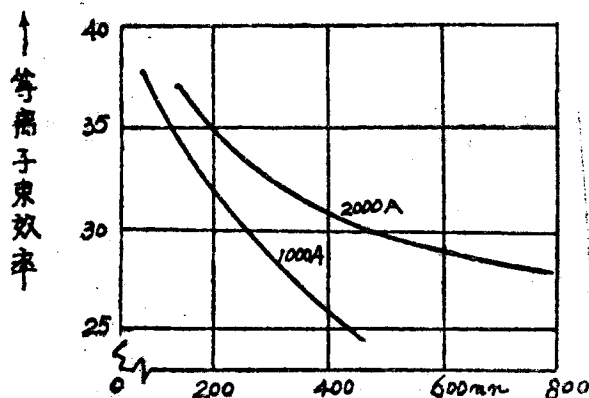
图四

7. 图五为弧长与等离子效率的关系。

弧电流: $I_B = 1 \sim 2$ 千安。

工作气体: 氩气

流量: $4 \text{ 米}^3/\text{小时}$

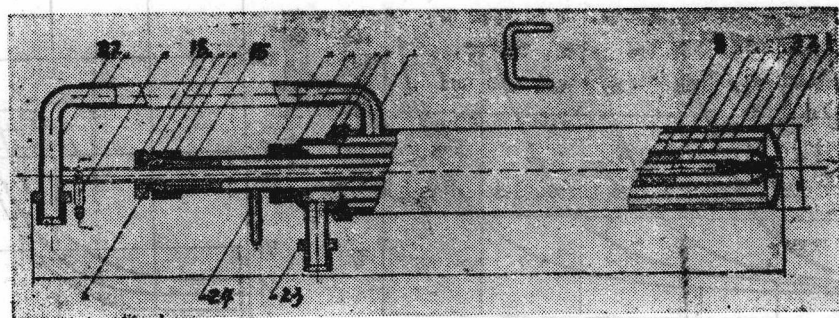


图五

三、等离子熔炼喷枪结构及主要参数

等离子喷枪是等离子熔炼的关键部件。我所喷枪结构如照片三所示。主要部分介绍如下:

1. 喷咀: 采用紫铜棒车制而成。
2. 阴极: 将铈钨杆 (直径为 $\phi 10$ 毫米) 焊接在水冷阴极铜管端部。
3. 枪体: 由内、外黄铜套管、隔水管和黄铜上体组合而成, 并用橡皮密封圈密封。
4. 氩气分配器: 采用尼龙棒车制而成, 使氩气以旋转方式从喷口喷出, 同时起阴极定位作用。
5. 阴极绝缘定位器: 采用尼龙棒车制。
6. 另件号22, 23为阴、阳极水冷电缆接头。



照片三

1. 喷咀; 2. 阴极; 3. 枪体; 8. 氩气分配器; 15. 阴极绝缘定位器;
18. 阴极调节器; 22、23. 阴、阳极水冷电缆接头; 24. 氩气管接头

7. 阴极调节器：调节阴极位置，并起绝缘作用。

8. 另件号24为氩气管接头。

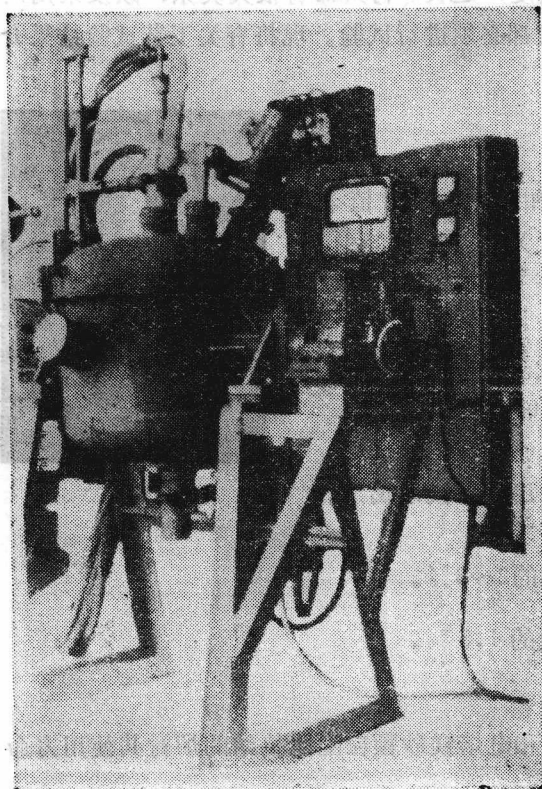
主要电气参数：

1. 转移弧最大电流：1200^A~3000^A（变压器功率为320KVA时最大电流3000A，变压器功率为160KVA时最大电流为1200A）
2. 转移弧最高电压：140^V~200^V（变压器功率为320KVA时最高电压200^V，变压器功率为160KVA时最高电压140^V）
3. 非转移电流：200~300^A。
4. 非转移电压：30~40^V。
5. 等离子弧长度为288mm以上。

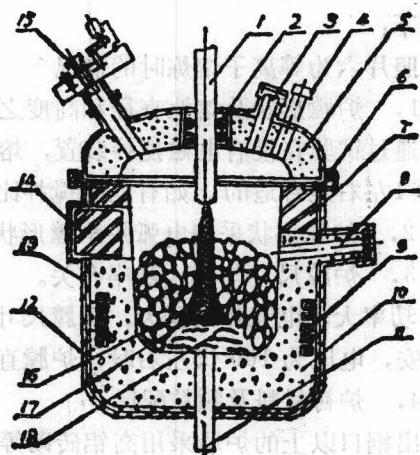
四、等离子炉的结构

我所现有二种等离子炉结构形式。一种是机械式，一种是液压式。照片四，为机械式，容量为50公斤等离子炉。其喷枪升降机构，采用手摇动一对伞齿轮，带动丝杠旋转从而使固定在丝杠螺母上的喷枪升降。炉体，采用一对蜗轮蜗杆，手摇倾动。其结构比较简单。液压式炉，炉体倾动采用二只能向前旋转100°角的油马达带动。炉盖采用油缸升起200毫米高，并向右侧旋转90°，这样便于加大块料和维修炉体。喷枪升降，亦采用液压升降装置。

炉子的主要组成部份如下：照片五为结构示意图。



照片四



照片五 等离子熔炼炉结构示意图

1. 喷枪； 2. 石棉绳； 3. 测温孔； 4. 操作孔；
5. 耐火水泥炉盖(或水冷炉盖)； 6. 石棉绳；
7. 高铝砖； 8. 出钢口； 9. 电磁搅拌线圈；
10. 铝镁尖晶石炉衬； 11. 阳极； 12. 石棉板；
13. 炉壳； 14. 炉门盖； 15. 频闪观察孔；
16. 炉料； 17. 等离子体电弧； 18. 钢液

1. 炉盖。炉盖有二种形式：一种是在钢壳内用耐火水泥捣制而成，另一种为水冷炉盖。盖上有测温孔，操作孔，频闪规定装置，炉盖正中有喷枪孔，它也是加料口。

2. 炉体，在钢壳内，炉墙采用高铝砖砌成，熔池用电熔镁砂捣制。炉体上开有可封闭的炉门和出钢口

3. 喷枪升降机构。

4. 炉子倾动机构。

5. 支架。用角钢焊接而成。

6. 频闪规定装置。采用小直流电动机，带动一个装有摩擦轮的铝盘，铝盘上开有一个小园孔，该孔通过窥孔，以便连续观察炉内情况，而不受炉内烟气沾污玻璃的影响。

7. 电磁搅拌线圈。采用紫铜管绕制而成，每圈都用玻璃丝布缠好，外涂清漆和环氧树脂，采用水冷。

8. 主阳极。采用水冷 $\phi 60$ 紫铜电极。

9. 冷却系统。采用循环冷却装置。冷却水采用软水，水压为4公斤左右。

10. 氩气采用瓶装，通过流量计供给。氩气纯度为99.99%。

五、等离子熔炼工艺试验及质量检查

等离子熔炼，由于等离子体电弧温度高，电弧长度与电压成正比，为了取得合理的炉膛尺寸，熔池直径和高度之比值对加快熔化金属速度，延长炉衬寿命有很大关系，以及采用何种材料的主阳极，影响喷枪使用寿命的各种因素都必须进行试验。现将有关工艺试验结果介绍如下：

照片六为等离子熔炼时的情况

1. 炉膛形状及熔池直径和高度之比值。

通过试验在没有电磁搅拌装置，熔池直径和高度之比值在3.5:1左右是合适的。如有电磁搅拌比值则可改为2:1左右。

2. 炉膛形状采用电弧炉炉膛形状，可保证一次装料。

3. 炉膛尺寸与输入功率有关。

功率大，电弧作用区大，炉膛尺寸也要加大。一般转移电流在1000安，电压为100伏左右时，炉膛直径要在200毫米以上。

4. 炉衬材料及颗粒配比。

出钢口以上的炉墙采用高铝砖砌等，熔池用电熔镁砂捣结。其颗粒配比如下：

2~2.5毫米	占25%。	硼酸	总量的2~3%。
0.6~1.0毫米	占25%。	水	总量的1.5%。
0.3~0.6毫米	占30%。		
<0.1毫米	占20%。		

按照上述炉膛形状，熔池直径和高度之比值和电熔镁砂颗粒配比捣结的炉衬其使用寿命在120炉次以上。

5. 水冷阳极与石墨极使用情况



照片六

主阳极在等离子炉中很重要，要求它损耗少，寿命长，并便于拆换。为此进行了试验。试验结果如下：

采用石墨阳极时，消耗较大，对钢的质量有影响。每开一炉（ $\phi 75$ 石墨棒）25分钟约消耗80克。同时影响第二炉开炉。

采用水冷阳极时，使用寿命较长。但端面亦有熔损。因此一定要保证冷却好，在使用中要经常检查或定期拆检，防止发生泄漏爆炸事故。

6. 影响喷枪寿命的多种因素。

提高喷枪使用寿命的关键，是提高喷头的寿命。影响喷头使用寿命的因素大致有以下几个方面：

（1）喷头几何形状和尺寸。

开始我们设计的喷头，喷口处壁厚为10毫米，喷口形状为内大外小圆锥形外，口为尖角。这种喷头在一开非转移弧时，喷口尖角处就被打坏，如开转移弧时，则不到一分钟，喷口外口就烧成大洞漏水，以后通过多次改进，设计成壁厚为4 mm，喷口为内大，外大，中间小的圆弧曲线形，外口为R 2的园弧形。喷口最小直径比铈钨极直径大1~1.5毫米左右。这样就可将铈钨极端部伸到喷口的外口处。

通过上述改进，喷头使用寿命一般可达100炉次以上。

（2）喷枪冷却系统。

由于熔炼用喷枪，枪体比较长，同时要伸到炉内。所以喷枪的冷却系统应能保证一定的水压和水量，并且要使喷口处，首先得到充分冷却。这就要求喷口处的水流速加大，才能将瞬间产生的高温热量带走。我所现用水压为3.5公斤/厘米²，最好将水压提高到6公斤—10公斤。

（3）水质的影响。

水质对喷头寿命有很大影响。以前我们采用井水冷却，结果在喷头水冷却部份产生一层厚约1/3毫米以上的白色水垢，影响了喷头的导热性，使喷口容易烧坏。采用软水后，就没有水垢产生。

（4）铈钨阴极和喷头的同心度要好。铈钨阴极，头部形状要呈圆锥状，这样有利于氩气流通，能起到稳定电弧的作用。

（5）操作时要注意阴极与喷口之间有无短路现象。喷枪端部与炉料距离不要太近，以免最初冲击电流太大，损坏喷口。

7. 电磁搅拌线圈的布置及应用。

电磁搅拌线圈的作用有二个。一是起压缩电弧，并使电弧旋转，提高弧温扩大熔化区，加快熔化速度的作用。二是使钢液旋转，起钢液温度，成分均匀化的作用。它是用相互绝缘的六圈矩形紫铜管制成，内通水冷却。打结炉衬时，将它放在炉壳里面，熔池耐火炉衬的外面。其底部约高出熔池底20毫米左右。

在熔化过程中加入电磁搅拌时，会出现如下几个明显特征：

1. 电弧旋转。
2. 电流下降约400安。
3. 钢液按顺时针或逆时针方向旋转。
4. 炉内磁场很强。如用园钢从炉门拨料可感到吸力很大。

因此在熔炼开始时，不加电磁搅拌，待熔炼稳定炉料基本化清时再加，以加速熔化和使温度成分均匀。

8. 输入功率的控制与氩气流量、喷枪位置的关系。

在熔炼过程中，控制输入功率，除可通过饱和电抗器调压来调整外，再就是调整氩气的流量和喷枪的位置。在一定的流量范围内，氩气流量加大，功率越大，反之越小。喷枪离钢液越近电流越大。由于加饱和电抗器，功率损失比较大。故在熔炼过程中，这三者要同时考虑。据熔炼情况，开始起弧时，可加饱和电抗器，降低冲击电流，弧稳定后，将其撤去，以后调整功率，尽可能调整氩气流量和喷枪位置。但是氩气流量太大，会造成氩气消耗过多。喷枪位置太高，等离子电弧长，当炉料基本化清后则热能利用又差，对炉衬寿命有影响，因此希望采用短弧操作。所以正确控制输入功率，就是要保证在最大功率输送的情况下，喷枪位置恰当，电能和氩气耗量少，熔化速度快。

9. 钢液温度的控制。

为了测定炉内钢液温度，我们曾做过如下试验，

(1) 采用铂铑—铂热电偶和钨铼热电偶，由炉顶测温孔插入钢液，但几次都因等离子弧烧断热电偶而失败，此外，炉内磁场很强，对热电势亦有影响。

(2) 用快速热电偶从炉门插入钢液，但由于热电偶外面的硬板纸和纸套管的燃烧，使钢液沸腾，钢液由炉门溢出，同时产生浓烟，影响等离子弧的正常燃烧而断弧。

因此目前只能凭经验测温。即根据一定的输入功率和熔炼量及熔化时间估计已全部化清时，从观察孔观察钢液，如液面干净、明亮、少量浮渣的流动性好，并用 $\phi 12$ 毫米的园钢从炉顶操作孔插入钢液内，略加搅动，约五秒钟抽出院钢，其插入钢液的一端发白亮，而且烧成象铅笔尖一样，这时钢液温度一般在1600度以上。出钢后，再用铂铑—铂热电偶插入钢包内测量钢液温度。

10. 钢液化学成分的控制。

在炉料和合金成分均已准确知道的情况下，进行配料计算，一次布入炉内。熔点低的以及易氧化的合金料，布在靠炉壁的地方，熔点高的，不易氧化的合金料，布在炉子的中心部位，但不要布在主阳极上。少量希望熔化后期加入的合金，经过预热后，可由炉顶操作孔加入。

合金钢配入炉料的合金元素回收率如下：

C: 85~100% (熔炼含炭量高的钢种、合金铸铁、钴铬钨合金等配入炭量按100%计算，熔炼中炭钢按90%计算)。

Si: 95%, Mn: 95%,

Cr: 95~98%, Mo: 100%,

Ni: 100%, Co: 100%,

W: 100%, Ti: 95%,

Nb: 100%

用等离子炉重熔钢材时，其化学成分变化很小。(如表一)

表一

钢 种		2Cr13		GH302		ЭИ572	
熔 炼 方 法		母 材 重 熔		母 材 重 熔		母 材 重 熔	
化 学 成 分		母 材	重 熔 后	母 材	重 熔 后	母 材	重 熔 后
	C	0.18	0.18	0.08	0.07	0.32	0.33
	Si	0.19	0.27	0.19	0.14	0.6	0.61
	Mn	0.32	0.38	微	微	1.33	1.27
	S	0.022	0.011	0.006	0.005	0.004	0.004
	P	0.026	0.013	0.008	0.009	0.021	0.021
	Cr	13.75	12.64	14.37	14.49	19.32	19.36
	Ni			40.05	39.64	8.51	8.62
	W			3.13	3.37	1.41	1.41
	Mo			2.38	2.3	1.28	1.3
	Al			1.84	1.95		
	Ti			2.7	2.68	0.15	0.12
	B			0.013	0.0165		
	Nb					0.5	0.49

用等离子炉重熔铜合金时，其化学成分见表二。

表三

熔 炼 方 法	化 学 成 分 (%)				
		铜	铅	铝	锌
母 材 重 熔	母 材	80.62	6.5	6.38	5.05
	重 熔 后	82.94	6.2	6.37	3.82

用等离子炉重熔铝合金时，其化学成分见表三。

表三

熔炼方法	化 学 成 分 (%)						
		Cu	Mn	Si	Ti	Fe	Cd
母材重熔	母 材	4.6	0.76	0.17	0.4	0.15	0.24
	重熔后	5	0.76	0.16	0.32	0.35	0.26

11. 熔炼质量的检查。

现将 GH302、ЭИ572、3150、17—7MoV 合金钢的铸态性能和 2Cr13 合金钢的锻造性能及有关数据对比列表如下：

GH302 铸 态 性 能

表四

熔 炼 方 法	机 械 性 能				
		抗 拉 强 制 (公斤/平方厘米)	伸 率 ($\sigma_s\%$)	缩 率 (%)	冲 击 值 (公斤·米/厘米 ²)
等离子熔炼	常 温	89	12	17	4.8
	700 °C	68	6.4	13.5	/
真空熔炼	常 温	$\frac{78-91}{78}^*$	$\frac{2.3-10.8}{5}^*$	$\frac{2.6-16.8}{5}^*$	$\frac{2.1-5.3}{3}^*$
真空浇注	750 °C	$\frac{66.5-81}{70}^*$	$\frac{2-5.8}{5}^*$	$\frac{4.5-22.5}{5}^*$	/ *
非真空熔 炼氩气保 护浇注	常 温	77.3	2.1	4.6	1.5
	700 °C	78	2.3	7	/

* 最小值—最大值
总平均值

ЭИ572 铸 态 性 能

表五

炉 别	机 械 性 能			
	抗 拉 强 度 (公斤/厘米 ²)	延 伸 率 ($\delta_5\%$)	缩 率 (%)	冲 击 值 (公斤·米/厘米 ²)
等 离 子 炉	68	32.5	44.5	6.7
非真空感应炉	73.5	19.4		3.45

炉 别	机 械 性 能					
	σ_b (kg/mm ²)	σ_s (kg/mm ²)	δ %	ψ %	α_k (kg·m/cm ²)	H _B
等 离 子 炉	65~80	45~65	15~25	45~55	5~8	280~310

由表四、五可见等离子熔炼的钢机械性能比非真空感应炉熔炼的钢高，特别是塑性指标很高，可达真空熔炼水平。由表六可见2Cr13铸态性能可达到锻造性能标准。

六、等离子熔炼的经济分析

1. 设备投资。

一台容量为50公斤的等离子炉总投资约2~3万元，非真空感应炉约5万元，真空感应炉约10万元。

2. 熔炼成本。

表七

炉 别	熔 炼 量 (公斤) (合金钢)	平均熔炼时间 (分)	每炉平均耗电量 (度)	炉 衬 寿 命 (碱性炉衬)
等 离 子 炉	40	25	39.8	110 炉以上
高 频 感 应 炉	40	95	108	20 炉左右

由表七可知等离子炉熔炼40公斤合金钢的时间比感应炉熔炼40公斤合金钢的时间缩短70分钟，其熔炼速度为高频感应炉的3.8倍。每炉耗电量可节约68.2度电，约为高频感应炉耗电量的1/3左右。碱性炉衬的寿命可提高5倍以上。

3. 铁耗及合金元素回收率

大型等离子炉总铁耗约2%，电弧炉约3%~5%。

表八

炉 别	合 金 元 素 回 收 率					
	Cr	W	V	Mo	Mn	Ti
大 型 等 离 子 炉	99	99	96	99	96	60
电 弧 炉 (平均)	91	94.7/97.5	83/90	93	83/94	50

由表八可知等离子炉合金元素回收率高，这样可节约大量优质铁合金，另外用等离子炉

熔炼含氮钢，可通过气相，向金属中引入约70%的所需氮量，对于小炉子，钢的氮化仅需通过气相，而不必使用昂贵的含氮铁合金。

七、讨 论

1. “工欲善其事，必先利其器”。这说明设备、技术革新，是提高各项技术经济指标的一个重要途径，为要稳定重要配件的质量，仅可能实现“以铸代锻”，铸钢、铸铁、有色金属熔化设备的改革确实是摆在当前的一个重要课题。

通过近10年来的试验研究所得的各项数据和经济分析，证明新兴起来的等离子熔炼新技术，确实比现有铸钢、铸铁、有色金属车间应用的电弧炉、感应炉、真空感应炉、电阻炉具有更多的优越性、经济性、文明性。

通过多年来的生产实践，证明小型等离子炉是配精密铸造、进行金属材料试验研究，具有投资少、上马快、机动灵活、熔炼质量高的理想熔炼设备。从苏联、东德共同研制成功，并投产的容量为5吨、10吨、30吨的大型等离子炉的事实，说明在我国冶金工业，铸钢车间应用大型等离子炉具有广阔的发展前途。

等离子熔炼有色金属，目前国内还没有正式应用于生产，但通过我们的试验说明，用等离子炉来熔炼铝合金、铜合金、紫铜具有熔化速度快，耗电量小，熔炼质量高，劳动条件大为改善的优点，特别是熔炼含易氧化元素高的有色金属更有利。

2. 世界各国铸铁产量占铸件的比重很大，加上高强度铸铁产量成倍增长，以及能源和污染问题，促使各国铸造业、注意研究和发展新的铸铁熔炼技术。

当前国内外铸铁车间，熔炼铸铁，主要靠古老的冲天炉。它必须应用资源紧张的焦炭化铁，污染严重、铁水温度低，原材料场地大的缺点是众人皆知的。但它具有熔化效率比较高，少用电，技术已被工人所熟悉的优点，而始终能立住脚，并占主导地位。先进的工频感应电炉，虽然有很多优点，但还不能完全取代。目前为了适应现代高强度铸铁、合金铸铁的生产，一般铸铁车间除了冲天炉外，还配有工频感应电炉，电弧炉等，这样就使铸铁车间，设备投资增加，操作人员、熔化场地增加。

由于等离子弧新热源成功地应用于炼钢，这就为铸铁熔炼技术的发展开辟了新的途径。

一九七二年我们就在50公斤等离子炉内成功地熔炼了高铬铸铁、铬钼铜合金铸铁、钴铬钨合金铸铁，其熔炼速度比感应炉快4倍，耗电量比感应炉省2/3，熔炼质量高，已显示出等离子炉应用于化铁的优越性。但炉子小，不能连续熔化。

因此在此基础上，必须研究和设计能连续熔化生铁的新型等离子炉，既能高速熔化又能保温。也就是说它将兼有冲天炉和工频炉二者之优点，弃二者之缺点，自动化程度高的新型熔炼设备和新工艺。这如能实现将使铸铁熔炼技术攀登到新高峰，使铸铁熔炼技术和装备来一次大革命，其意义是重大而深远的。我所对此正在试验研究中。

八、结 论

1. 等离子体电弧，是一种纯净的、经济的、高效的新热源，无论在铸钢、精密铸造、有色金属和铸铁的熔炼及浇管口的切割等方面都很有应用价值。

2. 等离子炉是一种新兴的、经济的、高效少污染,可一炉多用的新型熔炼设备。它在铸钢、精密铸造、有色金属和铸铁的熔炼方面的应用,具有技术上的先进性,高产优质的经济性,以及自动化程度高,可使上述部门达到现代化之功效、所以很值得进一步组织力量,试验推广应用。

3. “等离子连续化铁”的工艺和装备的试验研究对发展等离子炉,发展铸铁熔炼技术具有重大的意义。

九、参 考 文 献

1. 等离子弧熔炼初步总结 戚所 1972.10.
2. 用于坩埚熔炼炉的直流等离子弧形成和特性。
《Elektrowärme International》1976.10. V.34. B5 P256—259
3. 等离子弧熔炼的新发展。 G.K.Bhat 冶金科技参考1978年第4期。
4. 等离子在冶炼中的应用。 松本修 冶金科技参考1978年第4期。
5. 钢和合金的等离子弧熔炼。
《ПЛАЗМЕНО—ЛУГОВАЯ ПЛАВКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ》
6. 铸铁熔炼法的动向。
“金属”石野等 1971年6月1日第41卷第10号通卷593号。
7. 等离子炼钢法。 印度《矿物与金属评论》1977年第12期。
8. 等离子炼钢法: 东德《经济消息》1977年11月10日。
9. 民主德国等离子熔炼技术的概况 Haus Fiedler《Neue Hulte》1976年2月
10. 第五届国际电渣及其特殊精炼会议的概况
《Industry Heating》1974年12月

大功率柴油机球铁曲轴铁模挂砂铸造

戚墅堰机车车辆工艺研究所 杨届平、申澎运

戚墅堰机车车辆工厂 任 福 祥

前 言

大功率柴油机球铁曲轴的内部缩松是生产中长期存在的关键问题之一。为了减少球铁曲轴的内部缩松，过去采取了许多措施，做了大量工作。但是由于没有深刻认识球铁的凝固特性，没有找到主要矛盾，措施的针对性不强，所以问题没有从根本上得到解决。在二千马力和四千马力柴油机球铁曲轴的生产中，缩松超过技术条件规定的经常在20~30%左右。

大功率柴油机球铁曲轴容易产生内部缩松是与球铁的凝固特性密切相关的，国内外进行了大量研究，取得了良好的效果。我们在研究球铁的凝固特性，分析砂型铸造大功率柴油机球铁曲轴缩松产生原因的基础上，提出了采用铁模挂砂铸造工艺生产大功率柴油机球铁曲轴，以解决球铁曲轴生产中长期存在的缩松问题。

铁模挂砂铸造法又称“背面金型壳型法”“复砂造型壳型法”等，是六十年代末出现的一种新的铸造工艺方法。由于这一方法具有铸型刚度大，冷却速度快等许多优点，用于制造球铁铸件可以充分利用球铁在凝固过程中的石墨化膨胀，进行铸件的自身补缩，因而能够减少以至消除球铁铸件的内部缩松。

戚墅堰机车车辆工艺研究所和戚墅堰机车车辆工厂等单位自1974年以来对四千马力和二千马力柴油机球铁曲轴铁模挂砂铸造工艺进行了试验研究。经过反复探索，进一步认识了球铁的凝固特性，明确了大功率柴油机球铁曲轴内部缩松形成的机理，基本掌握了大功率柴油机球铁曲轴铁模挂砂铸造工艺的规律，浇注出一批合格曲轴，取得了良好效果。铁道部于1978年11月组织有关单位进行鉴定，一致认为铁模挂砂铸造法为大功率柴油机球铁曲轴的生产开辟的一条新的道路，对提高球铁曲轴的铸造质量具有重大意义，目前已推广应用。

(一) 大功率柴油机球铁曲轴内部缩松形成的原因

1. 球铁的凝固特性

关于球铁的凝固特性，大量研究证明球铁与灰铁有很大不同。球铁由于共晶温度转变范围较大，并且其导热系数较低，因而当球铁铁水浇入铸型之后，凝固外壳的形成和生长均较缓慢。资料〔1〕指出，球铁凝固层的增长率仅为灰铁的1/6。而在铸件凝固表层内，铁水

长时间处于液—固相共存状态，共晶液体在整个凝固期间均存在于全部断面上，即形成了球铁的所谓“糊状凝固”。灰铁由于共晶温度转变范围较小，导热系数较球铁大，使其凝固层的形成和生长均较快，即形成了灰铁的所谓“层状凝固”。这样，较厚的凝固外壳便自然形成一种紧固力量，使外壳内部的铁水在凝固过程石墨析出而引起的石墨化膨胀引向内部，起到充填补偿铁水凝固收缩的作用。而球铁在凝固过程中，由于外壳薄，强度低，而内部处于“糊状凝固”状态，凝固始终是在一个刚性较差的塑性固体壳内进行，壳内铁水每析出1%碳使体积膨胀达到2%以上，使固体壳内的铁水产生凝固内压力。球铁在凝固过程中石墨化膨胀力很大（这点在后面叙述的“石墨化膨胀力的测定”中可以看出），在刚性小的铸型中将引起型壁移动，使铸件尺寸增大。与此同时铸件表层内的共晶熔液由于温度的下降也要产生体积收缩，这两者叠加在铸件内部形成的空隙，靠冒口等外来铁水进行补缩是很困难的。

2. 砂型铸造的工艺分析

（1）冒口的补缩作用

大功率柴油机球铁曲轴砂型铸造目前均采用横浇立冷、顺序凝固、冒口补缩的典型工艺。这一工艺从冒口的补缩作用来看，对于液态收缩能够起到一定的作用，但是对凝固过程中的收缩，如前所述，由于球铁呈“糊状凝固”，同时由于曲轴结构复杂、重叠度小，更增加了铁水在补缩过程中的阻力，因此靠冒口中的铁水在凝固过程中进行补缩是非常困难的。

由于采用的是砂型铸造，尽管是烘模，但比起凝固过程中石墨化膨胀所产生的凝固内压力来，铸型的刚度仍然是不够的，在凝固过程中石墨化膨胀而引起的型壁移动还是很大，使曲轴的外形尺寸胀大，内部形成缩松。

（2）冷铁的作用

为了减少砂型铸造球铁曲轴的内部缩松，在缩松较大的部位曾放置外冷铁，对于吸收铁水的液态过热，减少部份液态收缩，改善该处的冷却条件，有一定效果。

但是冷铁本身并不能对凝固过程中球铁产生的体收缩提供任何液态铁水的补偿，一般冷铁所以对消除铸件的缩松有一定效果，主要是它使整个铸件加强了指向冒口的顺序凝固，增加了冒口的有效补缩距离，从而提高了冒口的补缩效果。但对大功率柴油机球铁曲轴来说，冒口的补缩距离既是有限的，而又由于球铁的凝固特性在凝固过程中靠冒口铁水补缩也是困难的，因此采用外冷铁其作用也不过吸收铁水的部分液态过热，减少部分液态收缩，对凝固过程中的体收缩不会有任何作用。

（2）冒口加压

为了减少大功率柴油机球铁曲轴的内部缩松，在砂型铸造的基础上曾采用了冒口加压工艺。曲轴浇注之后在冒口顶部通压缩空气或氮气，试验最大压力曾达八个大气压。采用冒口加压工艺的球铁曲轴经探伤，内部缩松没有多大变化，效果不大。主要原因是：虽然冒口加压之后增加了冒口的有效补缩距离，但由于铸型为砂型，刚度较低，球铁凝固过程中外加压力与石墨化膨胀力叠加，引起了型壁的更大移动，抵消了冒口加压的补缩作用。所以采用冒口加压工艺在砂型铸造条件下，也不能很好地消除球铁曲轴的内部缩松。

综上所述，球铁在凝固过程中一方面由于温度下降共晶铁水要产生体积收缩，另一方面由于石墨析出要产生体积膨胀。如果这一过程在一刚性的外壳内进行，由于两者相互叠加的结果，可以互相抵消而不产生缩松。但是球铁在凝固过程中外壳很薄，处于塑性状态，不足以抵抗石墨化膨胀所产生的压力，因此就对铸型提出了比较高的要求，使铸型的刚度成为解