



电渣重熔知识

冶金工业出版社

电渣重熔知识

冶金部钢铁研究院炼钢室 编

冶金工业出版社

电渣重熔是生产高质量钢和合金的重要方法之一。本书较通俗地介绍了电渣重熔这一新的冶炼工艺的原理、设备、工艺以及电渣钢的质量和电渣重熔的发展动向。可供冶金战线的有关工人和干部阅读。

电 渣 重 熔 知 识

冶金部钢铁研究院炼钢室 编

*

冶金工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/32 印张 2 3/8 字数 48 千字

1974年11月第一版 1974年11月第一次印刷

印数 00,001~8,360 册

统一书号: 15062·3123 定价(科三) 0.21元

毛主席语录

路线是个纲，纲举目张。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

目 录

一、概述	1
二、电渣重熔原理	3
1. 基本过程	3
2. 冶金反应	4
3. 凝固过程	12
4. 能量的产生与消耗	14
三、电渣炉	16
1. 电源变压器	17
2. 自耗电极升降机构	18
3. 结晶器和底水箱	21
4. 电气控制及测量仪表	22
5. 电渣炉炉型	24
四、电渣重熔工艺	29
1. 自耗电极的制备	30
2. 炉渣的选择	34
3. 电参数的选择	39
4. 冷却水的使用	43
五、电渣钢的质量	43
1. 电渣钢的纯洁度	44
2. 电渣钢的致密性及其低倍组织	48
3. 电渣钢化学成分和组织均匀性	49
4. 电渣钢的机械性能和工艺性能	55
六、电渣重熔的发展动向	59

1. 电渣炉大型化.....	59
2. 以铸代锻.....	61
3. 进一步提高电渣钢的质量.....	63

一、概 述

随着机械、动力、石油、化工、航空工业等部门的飞跃发展及原子能工程、火箭和宇航技术的出现，人们对钢和合金的性能提出了愈来愈高的要求，例如，要求零件或设备耐高温、抗腐蚀、高强度，以及在某些极复杂的条件，如高温、高压、动载荷、高速度等条件下工作。为此，人们除研制新的钢种和金属材料外，在冶炼工艺方面进行了大量的研究工作。发现并应用了一些特种冶炼方法。把经过普通冶炼方法(如平炉、转炉和普通电弧炉)炼出的钢和合金进行再精炼，以提高钢和合金的冶金质量，生产高质量的金属材料，电渣重熔就是其中的一种。

提高冶金质量主要有两个方面：（1）提高钢和合金的纯洁度；（2）获得均匀致密的结晶组织。前者就是要降低钢中气体和非金属夹杂物的含量。后者就是要降低或消除在液体金属凝固时所产生的成分偏析、组织不均匀、缩孔和疏松等低倍缺陷。

电渣重熔法炼钢在上述两个方面具有突出的优点。电渣重熔过程具有去除非金属夹杂物的极有利条件，经过电渣重熔的钢和合金有很高的纯洁度。用一般方法冶炼的钢中含有的非金属夹杂物、经过电渣重熔后可以去除80~90%。电渣钢锭是在水冷结晶器内强制冷却凝固，因此钢锭具有致密的结晶组织，一般不出现普通冶炼方法所产生的缩孔、疏松等低倍缺陷。

电渣重熔工艺起源于电渣焊。1954年苏联在电渣焊研究

中发现焊缝金属的质量高于母材的质量。后来把大断面金属棒作为电极代替焊丝，象板电极电渣焊那样，经过重熔获得了高质量的金属。

近十几年来，美国、苏联、英国、法国、西德、奥地利、日本等国家相继采用电渣重熔法生产高质量的钢和合金。据统计，世界电渣钢的生产能力1969年约58万吨，1972年增至90万吨。电渣钢的品种由最初的几个扩大到十几个、上百个，甚至已扩大到重熔铜、钛等有色金属领域。电渣钢锭的重量也由开始时的几公斤、几百公斤增大到几十吨、上百吨。

电渣重熔法炼钢的迅速发展是由于它本身固有的优点所决定的。人们知道，还可以用真空电弧炉和电子束炉来获得高质量的钢和合金。但这两种炉子都需要有一套真空系统，大功率直流发电机；电子束炉还要有一套复杂的电子枪设备。与此相比电渣炉设备较简单、容易制造，因而投资省、上马快。电渣重熔金属材料的质量可以和真空自耗重熔的相媲美，在表面质量等方面甚至更好，但在去气效果方面不如真空自耗炉。

现在，电渣重熔已成为生产高质量钢和合金主要方法之一。可以预料，随着这一工艺的发展，技术的日臻完善，用电渣重熔法生产的金属材料将能更好地满足飞跃发展中的科学技术的需要。

二、电渣重熔原理

电渣重熔是把用一般冶炼方法制成的钢(通常是电炉钢)进行再精炼的工艺。电渣重熔炼钢的原料是自耗电极,自耗电极可以是铸造的、锻造的或用切头切尾焊成的,在重熔过程中电极被通过电流的渣池加热并逐渐熔化掉,所以叫自耗电极。

1. 基本过程

电渣重熔的基本过程如图 1 所示。在铜制水冷结晶器内装有高温高碱度的熔渣,自耗电极的一端插入熔渣。自耗电极、渣池、金属熔池、钢锭、底水箱通过短网导线和变压器形成回路。

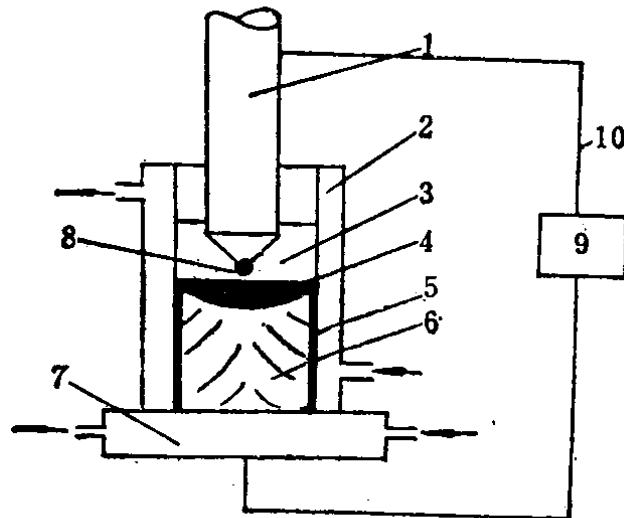


图 1 电渣重熔示意图

- 1—自耗电极; 2—水冷结晶器; 3—渣池; 4—金属熔池;
5—渣壳; 6—铸锭; 7—底水箱; 8—金属熔滴; 9—变压器;
10—短网导线

当电流通过回路时，渣池靠本身的电阻加热到高温（在通电过程中，渣池不断放出电阻热又称焦耳热）。自耗电极的顶部被渣池逐渐加热熔化，形成金属熔滴。然后金属熔滴从电极顶部脱落，穿过渣池进入金属熔池。由于水冷结晶器的冷却作用，液态金属逐渐凝固形成铸锭。

铸锭由下而上逐渐凝固，使金属熔池和渣池不断向上移动。上升的渣池在水冷结晶器的内壁上首先形成一层渣壳。这层渣壳不仅使铸锭表面平滑光洁，也起保温隔热的作用，使更多的热量从铸锭传导给底部冷却水带走，这有利于铸锭的结晶自下而上的进行。

电能是由变压器供给的，通过电极送进速度来保持电流的恒定。由于电渣重熔精炼过程是在高温高碱度的渣中进行的，渣和钢液之间存在着强烈的冶金反应。

2. 冶金反应

冶金反应是在下述三个阶段发生的：

- （1）插入渣池的自耗电极末端熔化和形成熔滴的阶段；
- （2）金属熔滴脱离电极，穿过渣池，进入金属熔池的阶段；
- （3）金属熔池在凝固结晶前的停留阶段。

非金属夹杂物的去除

非金属夹杂物去除的过程是夹杂物被熔渣吸收的过程，在此过程中，熔渣对夹杂物的吸附起决定性作用。一般来说，钢液和夹杂物的界面张力 $\sigma_{\text{钢-夹杂}}$ 愈大，熔渣和夹杂物的界面张力 $\sigma_{\text{渣-夹杂}}$ 愈小，夹杂物也愈易被熔渣吸附。由于这种物

理吸附作用，非金属夹杂物便在钢-渣界面上由钢液转入熔渣中。

电渣重熔最显著的特点是钢渣接触面积大，可达 300 米²/吨钢

（普通电弧炉钢渣接触面积为 0.3~0.7 米²/吨钢）。在电极末端分层熔化时，如果夹杂物的尺寸大于熔滴薄层，夹杂物便显露出来，直接被炉渣所熔解吸收，如图 2 所示。小于熔滴薄层尺寸的夹杂物，由熔滴薄层内部向表面扩散，尔后在钢渣接触界面处进入渣中。

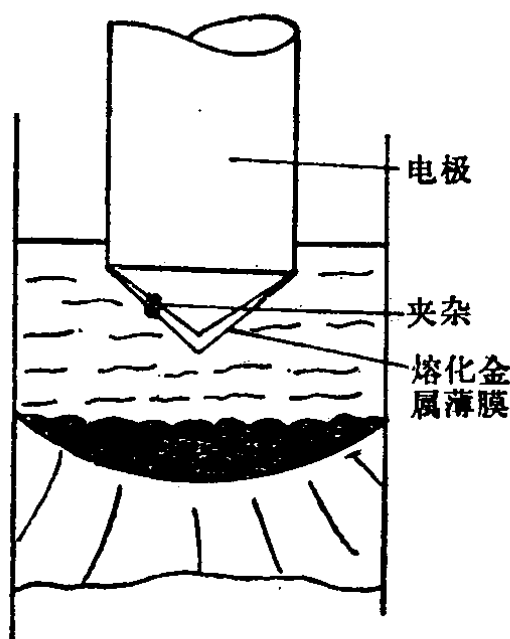


图 2 电极末端夹杂物的去除

当金属熔滴通过渣池进入金属熔池后，则主要靠非金属夹杂物浮升到钢-渣界面上才能被熔渣所吸附。非金属夹杂物的浮升速度，可以按斯托克公式计算：

$$V = \frac{2}{9} g \frac{1}{\eta} r^2 (d_{\text{钢}} - d_{\text{夹杂}})$$

式中 V ——夹杂物浮升速度，厘米/秒；

g ——重力加速度，981 厘米/秒²；

η ——钢液粘度，克/厘米·秒；

r ——夹杂物半径，厘米；

d ——钢液和夹杂物的密度，克/厘米³。

从上述公式可以看出，夹杂物在金属熔池中的浮升速度与它的半径平方成正比。夹杂物颗粒愈大，其浮升速度愈

大。由于电渣重熔过程钢液自下而上地凝固，因此当金属熔池呈浅平形状时，可以创造一个浮升去除夹杂物的有利条件。

由于上述的浮升、扩散、吸附等作用，加之金属的熔化和尔后的结晶是在铜制水冷结晶器内进行的，钢液不再受到耐火材料的污染，所以钢中的非金属夹杂物绝大部分(90%)可以在电渣重熔过程中去除掉。

前面曾指出过，电渣重熔时冶金反应发生在电极熔化并形成熔滴、金属熔滴穿过渣池和在金属熔池停留至凝固前的三个阶段。

实验表明，非金属夹杂物的去除主要发生在第一阶段，在此阶段约有60%的夹杂物被去除。这是因为在电极末端熔化并形成熔滴过程中渣钢作用最充分。在电极末端锥体逐渐消熔过程中几乎任一部分金属都有机会和熔渣接触，这有利于夹杂物被熔渣吸收。另外在电极末端熔化并形成熔滴的时间，虽然不如金属熔池在凝固前停留的时间长，但比金属熔滴通过渣池的时间长。再有电极末端的温度最高（可达1800~2000℃）以及电极末端首先和熔渣接触，这时夹杂物的原始含量最高，也是去除夹杂的有利因素。

最后，少量的（约10%）非金属夹杂物以极细小的颗粒均匀地分布在凝固的钢锭中。

去 硫

电渣重熔时存在如下的脱硫反应：



上面的反应式中〔S〕表示钢中的硫，（O）表示渣中呈原子状态的氧。由于反应生成的SO₂是气态，所以反应总

是朝着去硫的方向进行。这就是电渣重熔所以能有效地去硫的原因。实验证明,电渣锭中硫含量可降至0.003~0.006%,去硫率可达80%。表1是不同牌号的钢重熔前后炉渣中硫含量的变化。表2是精炼萤石时,在渣上面加盖和不加盖的条件下硫含量的变化。表1的数据表明,重熔后渣中硫含量不仅没有增加,反而有显著的降低。表2的数据表明由熔渣进入炉气中的SO₂能迅速离开时,去硫效果更好,反之就差些。上述两个事实说明,电渣重熔时所以能显著地去硫是由于有气相的积极合作。更正确地说,是由于气相中的氧积极参与的结果。

不同牌号的钢重熔前后炉渣中硫含量 表 1

钢 号	渣 中 硫 含 量 %	
	原 始	重 熔 后
GCr15	0.040	0.013
2Cr13	0.030	0.022
CrMnNi2	0.040	0.020
18CrNiWA	0.030	0.018

在不同种件下精炼萤石的硫含量 表 2

实 验 条 件	化 学 成 分 %		
	S	SiO ₂	CaO
萤石原矿	3.7	1.22	3.22
带盖石墨坩埚中精炼	1.4	痕迹	4.36
无盖石墨坩埚中精炼	0.2	0.04	4.09

去 磷

电渣重熔时存在着如下的去磷反应：



[P] 表示钢中的磷，(O) 表示渣中的原子状态的氧。

生成的 P_2O_5 随后与渣中的 CaO 形成稳定化合物 $4CaO \cdot P_2O_5$ 。用 BaO 代替渣中的 CaO 能强化去磷。电渣重熔采用 $CaF-BaO$ 渣系的脱磷效果列于表 3。由表 3 可以看出，随着精炼的进行渣的去磷作用将显著减弱。这是因为渣中磷的氧化物含量增加，因而不利于脱磷反应进行的缘故。这一点与脱硫是不同的。

CaF-BaO 渣系的脱磷效果 表 3

钢 种	磷 含 量 %			
	电 极	钢 锭		
		尾 部	中 部	头 部
20	0.029	0.010	0.015	0.020
3 沸	0.054	0.012	0.017	0.026
1Cr18Ni9Ti	0.022	0.007	0.010	0.010

从表 3 可以看出，如从去磷的角度考虑电渣钢锭应以矮胖为宜，这样可以减少磷的偏析程度。

另外去磷是放热反应，高温下不利于去磷的进行，因此在保证电渣过程稳定的前提下，输入功率不宜过大。

去气（氧、氢、氮）

通常认为，电渣重熔时以溶解状态存在的气体是靠沸腾过程去除的，钢中气体以气泡形式穿过钢渣界面，再浮升到渣池表面进入气相，如图 3 所示。

电渣重熔时钢锭自下而上的轴向结晶是有利用气体排除

的。表 4 列出了一些钢在重熔前后气体含量的平均数据。由表 4 中可以看出，经电渣重熔后钢中氧含量一般降低 30~60%。氢含量也有所降低。氮含量的变化与钢中含不含易形成氮化物元素有关，如钢中不含钛、铌一类形成强氮化物的元素，重熔后氮含量急剧降低。反之，则氮含量将维持原有水平。

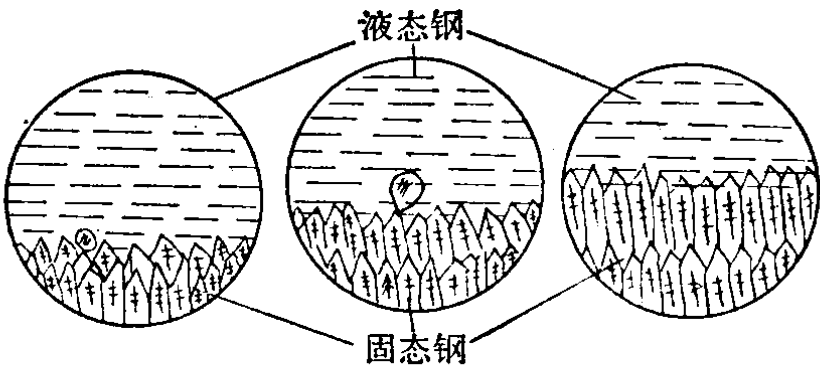


图 3 溶于钢中的气体从金属熔池去除过程的示意图

一些钢重熔前后气体含量的变化 表 4

钢 号	气 体 含 量 %		
	O ₂	N ₂	H ₂
18CrNiWA	原始	0.00550	0.01130
	重熔	0.00308	0.00765
0Cr18Ni9	原始	0.00346	0.07568
	重熔	0.00222	0.02725
ЭИ851	原始	0.00569	0.05286
	重熔	0.00256	0.06070
ЭИ847	原始	0.00157	0.05440
	重熔	0.00167	0.05740
ЭИ961	原始	0.0040	0.0250
	重熔	0.0021	0.0190

电渣重熔是在非真空条件下进行，显然去气效果不会有真空电弧重熔那么好。电渣重熔的去气效果与真空电弧重熔的比较，可以用重熔耐热合金和阿姆柯铁的数据说明，如表

5 所示。

电渣重熔与真空电弧重熔去气效果比较 表 5

研究金属	重 熔 方 法		气 体 含 量 %		
			O ₂	N ₂	H ₂
耐热合金	电渣重熔	原始重熔	0.0025	未测	0.0008
		重熔	0.0015		0.0005
	真空电弧重熔	原始重熔	0.0021	未测	0.0007
		重熔	0.0017		0.0003
阿姆柯铁	电渣重熔	原始重熔	0.09250	0.0154	0.00033
		重熔	0.00520	0.0147	0.00024
	真空电弧重熔	原始重熔	0.09250	0.0154	0.00033
		重熔	0.00255	0.0111	0.00009

从表 5 可以看出，当电渣重熔脱氧良好的耐热合金时，去气效果比真空电弧重熔还好。但重熔未脱氧的阿姆柯铁时，真空电弧重熔的去气效果比电渣重熔要显著得多。

电渣重熔去氧的效果比较好，一般认为是与氧化物夹杂的去除有关，另外去硫反应同时也是去氧的过程。

电渣重熔去氢程度与炉渣成分有关，如渣料干燥不好含

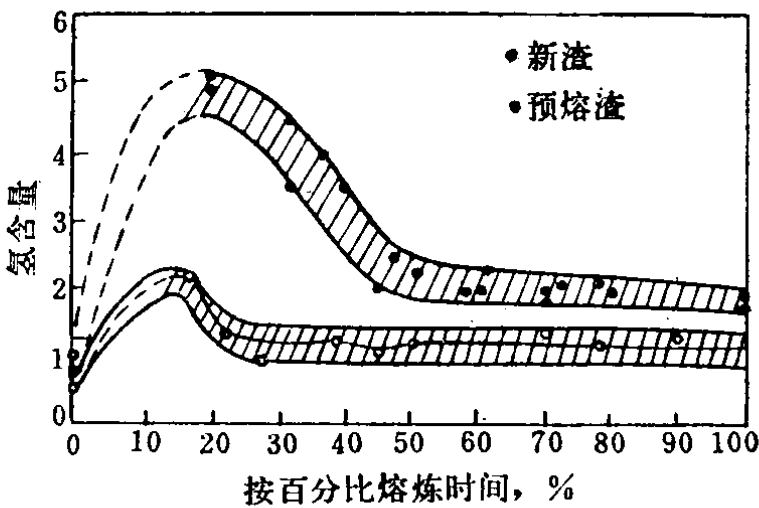


图 4 电渣重熔时氢含量的变化

水分大，渣的抗氢能力低或渣中碱性氧化物含量高时，则重熔金属中氢含量亦可能增加。图 4 表示重熔时使用新渣或预熔渣时金属熔池中氢含量的变化。

其它元素的烧损

图 5 表示出碳、硅、锰的烧损与炉渣碱度（渣中氧化钙与氧化硅的比值）的关系。由图可知，在碱性渣下重熔时，硅有明显的烧损，而锰、碳没有烧损。相反，在酸性渣下重熔时却看到硅的增加和锰、碳的下降。如果金属中含有铝、钛等比硅、锰更活泼的元素时，则首先与氧反应的是铝、钛等活泼元素。因此，在重熔含铝、钛等易氧元素的钢和合金时，应采取一些方法防止它们的氧化、降低这些元素的烧损。

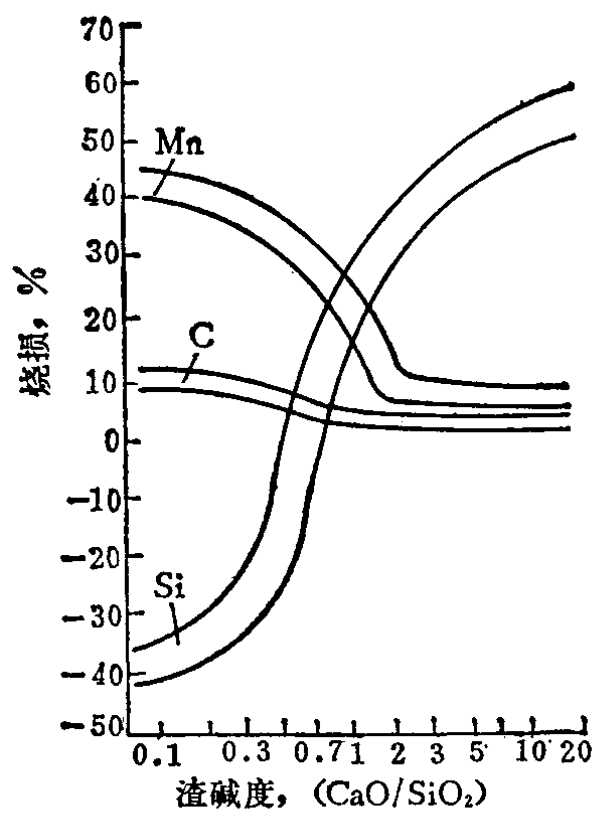


图 5 碳、硅、锰的烧损与炉渣碱度的关系