

58

大型铸锻件文集

第二十八集

上海重型机械厂技术情报组编

1979.6 上海

目 录

1. 电渣重熔工艺的实际应用和发展趋势	1
2. 电渣重熔对 Ni-Cr-Mo-V 转子钢转变温度及回火脆性的影响	19
3. 设计低回火脆性敏感性 Ni-Cr-Mo-V 钢在大型汽轮机转子上的应用	30
4. 锰对 Ni-Cr-Mo-V 钢机械性能的影响	45
5. 20 Cr-Ni-Mo-V 钢电渣焊接头各种温度下的性能	62
✓ 6. 钢锭中“A”偏析的形成研究	68
7. 计划测定大锻件均匀调质度的报告	87
8. 锻焊结构压力容器	124
9. 大型锻件的电渣焊接	143
10. 透平转子轴超声波探伤中灵敏度放大倍数效应	156
11. 非金属夹杂物与破坏评定	163

电渣重熔工艺的实际应用和发展趋势

(日) 门赖升雄等

一、引言

与常规熔炼工艺(大气熔炼—真空浇注工艺)相比,电渣重熔工艺(ESR工艺)在减少非金属夹杂物,改进机械性能和生产立方石有着优越的特点。不过虽然有这些优点,但因它的重熔成本高,所以这种工艺在开始时只限于用在航空飞行器和计算机等质量要求较高的零件中。

此种工艺的运用逐步扩展到转子轴和其他一些高质量的零件,这篇报告讨论了把电渣重熔工艺的应用从优质钢扩大到一般钢的可能性以及新的电渣重熔工艺的可能性。

本文第一部分包括:锻造比与机械性能之间的关系;锻造比与电渣重熔钢锭的纯净度和致密度之间的关系;然后讨论用缩小必要的锻造比来降低锻造成本和增加生产量的可能性。

这种工艺在经济上的相应的优缺点,比如,降低锻造成本,增加产量;重熔中的额外消耗等也进行了讨论。

本文的最后部分讨论了将来的技术展望和日立公司对电渣重熔工艺的一些新的运用。

二、电渣重熔钢锭的性能

1. 试样

a. 电渣重熔钢锭的制备

制备电渣重熔钢锭的设备和参数如表1所示，化学成分如表2所示。

表1、电渣重熔设备和重熔条件

电极	$\phi 580 \times 4,300$ 毫米
结晶器	$\phi 780$ 毫米 铜结晶器
熔渣	Al_2O_3 35%; CaF_2 65%
电压(平均数)	60伏
熔炼电流(平均数)	AC 17,000安
重熔速度	近似 10公斤/分钟

表2、试样的化学分析

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al
电极	0.15	0.23	0.38	0.010	0.008	0.10	2.53	1.34	0.36	0.14	0.05
电渣重熔钢锭 (8吨)	0.16	0.16	0.31	0.008	0.005	0.08	2.54	1.32	0.34	0.15	0.013
普通钢锭 (30吨)	0.18	0.01	0.35	0.008	0.009	0.10	2.50	1.35	0.36	0.13	—

电渣重熔过程中，除了硅、铝，特别是硫大量降低以外，其他化学成分无变化。目前情况下，硅和铝降低显著。而电极中硫的含量较低，所以硫的降低不如硅和铝那样显著。常规熔炼的30吨钢锭的化学成份也在表2示出。除了硅以外，化学成分几乎与电渣重熔钢锭相同，而这个钢锭经过碳脱氧工艺熔炼后，硅的含量就很低了。

b、锻造和热处理

图1示出电渣重熔钢锭的大小和锻造工艺。锻造前，在电渣重熔钢锭切取测定微观结构和纯净度的试样。

这个钢锭分段拔长达到规定的锻造比（分别为1.0, 1.5及2.0），然后切除钢锭底部。因为实际转子轴是由锻粗和拔长来锻造的，所以试验钢锭的顶部先锻粗（锻造比1.5），然后拔长达到额定锻造比（各为1.5, 2.0及3.0）。

锻造后，这些试块和未经锻粗的三分之一，在车间里经预先热处理（正火：930℃；回火：650℃），然后作超声波检验。试样尺寸是30×70×150毫米，是从试块的中心和外 π 作轴向和径向切制取得的，见图1。

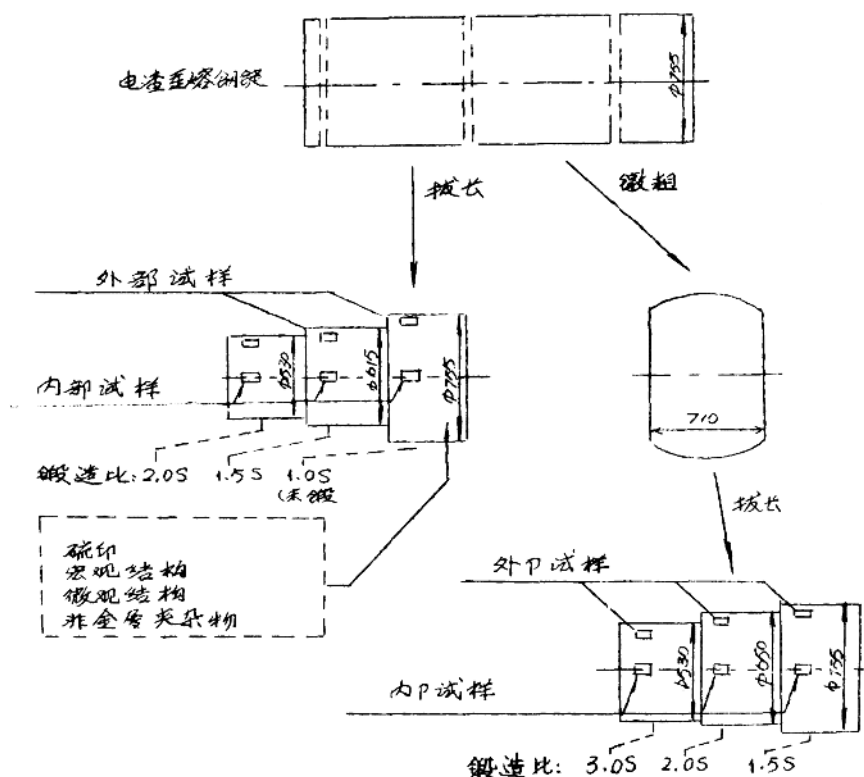


图1. 试块的锻造工艺和取样部位

常规塔炼30吨钢锭时，试样也是从转子轴的中心和外 π 作轴向和径向切制取得的，转子轴则经锻粗和拔长锻造，并在车间里经过预先热处理。

然后在实验室里从 840°C 开始将试样进行淬火和回火，如图 2 所示。淬火冷却速度模拟 810 毫米直径实际转子轴中心和外圆的冷却速度（近似于 $30^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 与 $1.100^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ ），回火保温时间：中心试样是 30 小时，外圆试样是 36 小时。

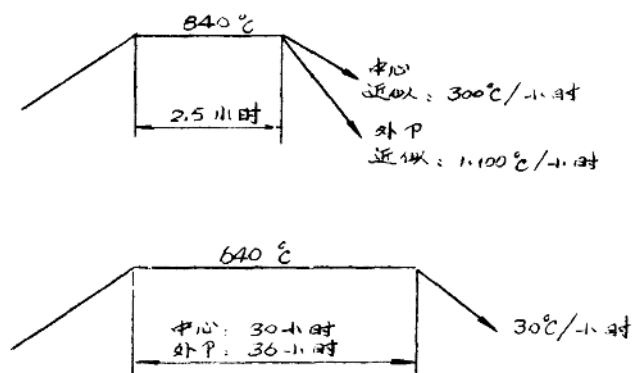


图 2. 试样的淬火和回火

2. 电渣重熔钢锭的内圆性能

a. 硫印和宏观结构

电渣重熔钢锭未经锻造时，其横断面中的硫印和宏观结构，可根据日本工业标准 (JIS) G0 560 和 G0 533 进行观察。

电渣重熔钢锭的硫印和宏观结构如图 3 图 4 所示。从图中可以清楚的看出：电渣重熔钢锭与常规熔炼钢锭相比，硫的含量和宏观偏析较低，铸造结构细密且看不到麻点。

图3. 电渣重熔钢锭的缩印

图4. 电渣重熔钢锭的宏观结构

b. 微观结构

图5显示电渣重熔材料和常规熔炼材料的微观结构，锻造

比是 $1/1.5$ 锻粗和 3.0 拔长。

两种材料的外口都有回火的贝氏体组织，中心口分含有回火的贝氏体和铁素体组织。如图 5 所示，电渣重熔材料与常规熔炼材料相比，其微观结构更加细密和均匀。

	中 心 ×100	外 口 ×100
电渣重熔材料 锻造比： $1/1.5$ 锻粗 3.0 拔长		
常规材料 锻造比： $1/1.5$ 锻粗 3.0 拔长		

图 5. 微观结构

二种材料中奥氏体晶粒的大小是基本相同的： $GO = 7.6-8$

C. 纯洁度

对电渣重熔材料和常规熔炼材料的纯净度作了测定。表 3 所示的纯净度是 4 个电渣重熔材料和常规熔炼材料试样的平均值。两种材料都经过热加工达到规定的锻造比。

表3. 纯净度指数 (%)

试 样	硫化物	硅酸盐	氧化物	总 量
电渣重熔材料 (中心)	0.001	—	0.011	0.012
普通材料 (中心)	0.009	0.024	—	0.013

注: 纯净度指数 $d = \frac{n}{p \times f} \times 100$

表中: n = 夹杂物占据的格数
 p = 视场内玻璃板上的格数
 f = 视场数

常规熔炼材料含有硫化物和硅酸盐夹杂物。电渣重熔材料中最多的夹杂物是氧化铝，而硫化物和硅酸盐夹杂物沿热加工方向很容易变形，所以在电渣重熔材料中几乎看不见。这就是为什么电渣重熔材料不受锻造比和锻造方向的影响，而总是具有均匀的机械性能的一个原因。铝硅酸盐夹杂物的直径是3-5微米。在电渣重熔材料中可以看到变形的铝硅酸盐夹杂物，尤其是在中心部分。

这就可以断定，电渣重熔工艺对降低夹杂物的数量和大小是非常有效的。

3. 机械性能

抗拉强度，屈服强度，延伸率和断后收缩率，在室温中用 JIS Z 2201, 4号小尺寸的抗拉伸试棒（直径为7毫米，标距长度为25毫米）作测定。冲击能和50%塑性断裂开始转变温度(FATT)用 JIS Z 2202, 4号试样（厚度2毫米V形缺口试样）来确定。

图6显示锻造比与机械性能之间的关系。当仅用板长时，锻造比是1.5和2.4。在1/1.5锻造时，锻造比是1.5、2.0和3.0。为了便于查阅，图6的右下角示出了普通材料用1/1.5和3.0时的各种数值。

(图6见第9页)

使用各种不同的鍛造比，所得的抗拉強度是一样的，近似70公斤/毫米²。而且，試样的方向和刀位以及鍛粗對抗拉強度的影响很小。

如图6所示，机械性能指标中抗拉強度是65-75公斤/毫米²，屈服強度是50-60公斤/毫米² (0.02%变形)。这些数值均介于常规熔炼材料的性能范围之内，即使是未经鍛造的電渣重熔鋼錠也是如此。与熔炼工艺无关。在所有的鍛造比中，除了断面收缩率随鍛造比的增加而有少量增加外，延伸率近似27%，断面收缩率近似75%，对試样的方向，刀位及鍛粗效果进行了观察，也可看到同样的倾向。電渣重熔材料的塑性值相当于普通材料操作范围的最高限度，在所有的鍛造比中延伸率为25-28%，断面收缩率是70-80%包括未经鍛造过的材料。可以很清楚地看到，冲击能随鍛造比和鍛粗效果的增加而增加，这种材料在任何鍛造比中的当量是21-28公斤-米，常规熔炼材料是21-27公斤-米，两者基本相同。

通常，鍛造比在3.0之内，则机械性能随鍛造比的增加而增加。在常规熔炼材料的实际操作中，使用3.0或更大的鍛造比，以保证机械性能鍛件緻密度。在鍛造比小于3.0时，電渣重熔材料和常规材料的机械性能是相等的。

这就证明電渣重熔材料甚至在未鍛状态下，用小于常规熔炼材料的鍛造比，就可得到足够高的冲击能。

在未经鍛粗时，增加鍛造比可改进中心刀分的转变温度，而对外刀则影响不大。電渣重熔材料在未鍛状态下，具有足够低的转变温度(0℃或更低)。

所以，只需较小的鍛造比就足够。在鍛粗时，中心和外刀的数值随鍛造比的增加而降低，这种趋势在外刀試样中看得更清楚。試样的FATT是25℃，低于同样鍛造比的常规熔炼材料。

在未经鍛粗的試样中，外刀的FATT无变化。但在1/5 鍛

注：属规格炼的疏松范围

111111

轴向, 中心 ○
径向, 中心 ●
轴向, 外p △
径向, 外p ▲

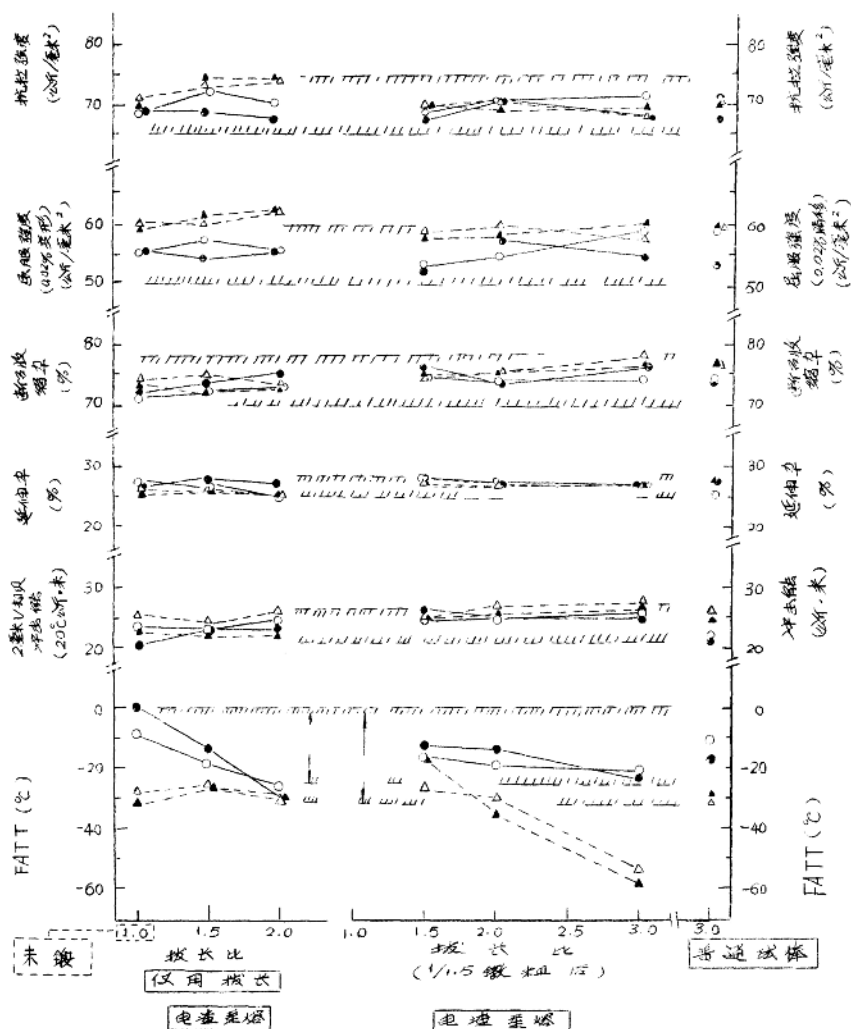


图6 锻造比对机械性能的影响

粗时，FATT 可用增加拔长比来加以改进。所以，在锻造操作中，锻粗对冲击能和 FATT 是有效的，而对抗拉强度，屈服强度，延伸率和断面收缩率无影响。

已出版有许多关于拔长比对电渣重熔材料机械性能的影响的报导。除了本文以外，也有少数报导谈了锻粗对电渣重熔材料机械性能的影响。虽然在锻粗对 FATT 的影响方面也得到了重要的见解，但还有待于进一步的研究加以证实。

4. 锻造比与超声波检验的关系

用直探法对电渣重熔材料进行了超声波检验，在锻态试块和铸态试块中都未发现裂缝回波。检验条件是：回波从一个直径为 2.8 毫米的平底孔中发出，平底孔位于 JISz 2345 的 GVB—2.8 型标准试块的底部（表面到底孔的长度是 150 毫米），使用 20 毫米直径的探头把回波调到 30% 的峰值，在屏幕中扫描，频率是 3 兆周。

超声波检验结果及 1.3—2.5 的各种锻造比变化如图 7 所示。

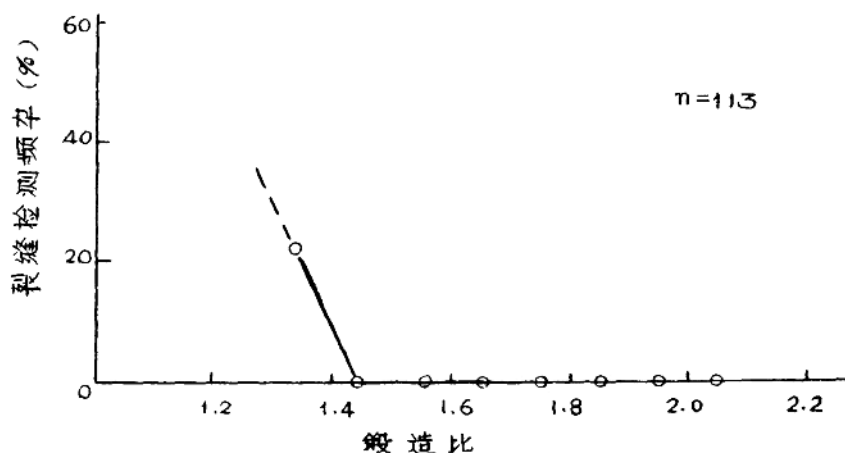


图 7. 锻造比对电渣重熔材料碳含量的影响

在锻造比小于 1.4 时, 可测出裂缝波。在 1.4 以上就没有裂缝波, 限止非致密区, 而且测出的缺陷是一些细微孔隙。

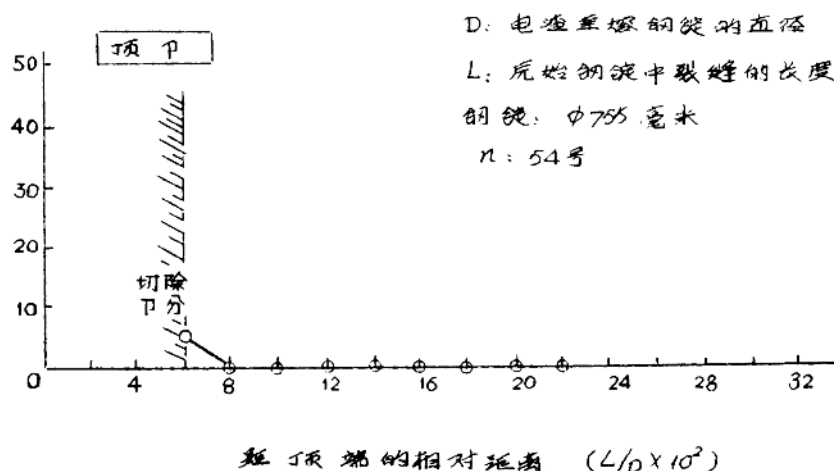
后来有裂缝波的材料经过 1.19—1.07 压比的锻造后(总锻造比是 1.44—1.56), 看不到缺陷。基于上述结果, 所需要的最小锻造比大约是 1.5。

在常规熔炼材料中, 需要的最小锻造比是 2.5—3.0。所以, 使用电渣重熔材料可节省锻造费用。

5. 材料顶卮和底卮的切除与超声波检验之间的关系

研究材料顶卮和底卮的切除与超声波检验结果之间的关系, 是为了取得电渣重熔钢锭所需的最少切除量。直径 755 毫米、长度 2400 毫米 (8 吨钢锭) 的电渣重熔钢锭在锻造后, 用超声波对其中 350 毫米宽, 250 毫米厚的区间进行了检验, 检验条件如第 4 节所述。

图 8 示出缺陷频率与钢锭顶卮到底卮的距离之间的关系



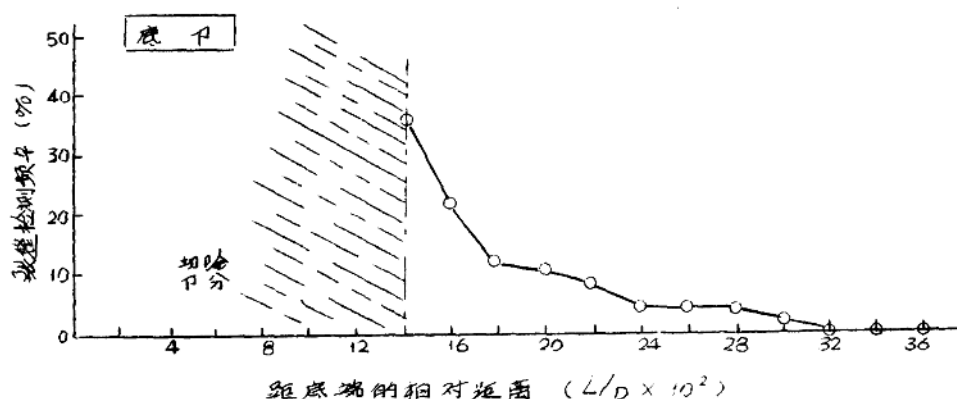


图8 电渣重熔钢锭顶端到底端的距离和检测频率之间的关系。

从图8中可以断定，顶 π 切除的长度相当于钢锭直径的8%，底 π 切除的长度相当于钢锭直径的32%。如以8吨电渣重熔钢锭为例，必须切除钢锭总体积的13%，也就是说顶 π 占3%，底 π 占10%。

在常规熔炼钢锭中，通常要切除钢锭总体积的15-25%，在转子轴锻件中，切除体积达到30-40%。所以，转子轴锻件如役用电渣重熔钢锭是很有利的。

6. 概括

研究了电渣重熔工艺的效果，以使电渣重熔钢锭用于转子轴锻件，得到如下结果：

- 1) 与常规熔炼材料相比，电渣重熔材料的疏松和宏观结构质量是高的。
- 2) 与常规熔炼材料相比，电渣重熔材料的微观结构是细密的。
- 3) 电渣重熔钢锭中没有疏松。
- 4) 电渣重熔钢锭的纯净度是显著的。夹杂物的直径小于5微

米，而且大部分是氧化铝。

5) 与常规熔炼材料相比，电渣重熔工艺改进了延伸率，断面收缩率，冲击能和FATT。

6) 电渣重熔材料用小于常规熔炼材料的锻造比，即可得到良好的机械性能。

7) 用电渣重熔材料可生产微裂纹件，甚至初除号也比常规熔炼材料的少。

三、电渣重熔工艺的发展趋势

1. 电渣重熔钢铁的经济比较

与常规熔炼钢铁相比，电渣重熔钢铁虽然增加了重熔工艺，但因为简化了锻造工艺，所以它能增加生产率，降低锻造成本，这可用下列公式来表示：

$$\{(A+B+C)(1+x)\} \cong [(aA+bB+C)(1+y)]$$

式中：A：常规工艺中材料成本的百分比

B：常规工艺中锻造成本的百分比

C：常规工艺中机械和其他加工费用的百分比

a：电渣重熔工艺的材料重熔

b：电渣重熔工艺的锻造费

x：常规工艺的报废率

y：电渣重熔工艺的报废率

对运用电渣重熔工艺的经济利益进行了计算，由表4列示以电机转子为例，其经济利益根据常规工艺的报废率而变化(x)（电渣重熔工艺的报废率假定为1%）。

表4 电渣重熔工艺的经济效果

对转子轴的典型计算

(假定电渣重熔报废率为1%)

		第一状态	第二状态	第三状态	第四状态
		铸态电渣重熔 电极	退火电渣重熔 电极	铸态电渣重熔 电极	退火电渣重熔 电极
现在的损耗百分					
A: 材料		45%	45%	50%	50%
B: 锻造		30%	30%	25%	25%
C: 机械加工		25%	25%	25%	25%
锻件重量	电渣重熔 报废率起 过常规工 艺锻小报 废率				
5,800 公斤		2%	4%	8%	10%
14,250 公斤		0%	0%	0%	0%
28,200 公斤		0%	0%	0%	0%

如表4所列，电渣重熔工艺的经济优点，在重型锻件中比在轻型锻件中更加明显。在14,250公斤以上的锻件中，即使常规工艺的报废率为零，电渣重熔工艺也比它更为经济。在5,800公斤的中型锻件中，使用退火电极的电渣重熔工艺比常规工艺有利得多，后者的报废率在10%以上，使用铸态电极时，这种工艺也^比常规工艺更加经济，后者的报废率在5%以上。

2. 电渣重熔工艺的技术应用

电渣重熔工艺用在航空工业，燃气轮机和发电工业中，以达到这些工业在技术要求上所需要的可信性和高质量，现在电渣重熔工艺不仅能生产圆柱形钢锭，而且能生产复杂形状钢锭。

目前电渣重熔技术上的一些新运用和发已。

- 1) 在大型的一般钢锭非致密的中化区打孔，并用电渣重熔充填（MHKW工艺）。
- 2) 生产组合式钢锭。
- 3) 生产由许多小钢锭组成的至型和巨型钢锭。
- 4) 生产空心钢锭。
- 5) 生产复杂形状钢锭。
- 6) 对一般钢锭进行热补浇。

胜田工厂在1968年开始运用电渣重熔，其技术上的一些发已由表5列出。（表5见第16页）

四、结 论

研究了电渣重熔钢锭的质量，钢锭顶口和底口的致密度，锻造比与机械性能，锻造比与内口致密度之间的关系。

电渣重熔工艺的经济^价值也进行了研究，结果如下：

- 1) 与常规熔炼材料相比，电渣重熔材料用较小的锻造比就可得到和常规熔炼材料同样良好的机械性能和内口致密度，从而降低了锻造成本。
- 2) 与常规熔炼材料相比，电渣重熔材料减少了顶口和底口的切除，也就增加了收得率。
- 3) 基于上述优点，产量越大，运用电渣重熔工艺就越有利。
- 4) 随着先进的电渣重熔设备和新技术的运用，可望大量生产优质低耗的产品。

译自《第八届国际锻压会议论文集》