

# 电渣重熔译文集



鞍钢钢铁研究所

一九七四年十月

# 毛主席语录

这次文化大革命，对于巩固无产阶级专政，防止资本主义复辟，建设社会主义，是完全必要的，是非常及时的。

不破不立。破，就是批判，就是革命。破就要讲道理，讲道理就是立，破字当头，立也就在其中了。

历史的经验值得注意。一个路线，一种观点，要经常讲，反复讲。只给少数人讲不行，要使广大革命群众都知道。

---

# 毛主席语录

社会的财富是工人、农民和劳动知识分子自己创造的。只要这些人掌握了自己的命运，又有一条马克思列宁主义的路线，不是回避问题，而是用积极的态度去解决问题，任何人间的困难总是可以解决的。

外国有的，我们要有，外国没有的，我们也要有。

TF 14  
5  
2

## 目 录

|                              |         |
|------------------------------|---------|
| 1. 电渣重熔钢的特点.....             | ( 1 )   |
| 2. 电渣重熔时氧的行为.....            | ( 13 )  |
| 3. 电渣重熔时硫的行为.....            | ( 22 )  |
| 4. 电渣重熔生产洁净钢.....            | ( 28 )  |
| 5. 用电渣重熔法生产的钢锭性能.....        | ( 31 )  |
| 6. 用电渣重熔法生产超大型钢锭.....        | ( 40 )  |
| 7. 用电渣重熔法生产大型锻件钢锭的研究.....    | ( 45 )  |
| 8. 用电渣重熔法和真空电弧重熔法重熔锻造钢锭..... | ( 50 )  |
| 9. 电渣重熔法的改进.....             | ( 60 )  |
| 10. 关于用消耗电极的电渣重熔钢锭质量的改进..... | ( 64 )  |
| 11. 通过电渣重熔提高钢的质量.....        | ( 66 )  |
| 12. 电渣炉.....                 | ( 69 )  |
| 13. 均匀精炼和连续铸造金属和合金.....      | ( 73 )  |
| 14. 电渣重熔法.....               | ( 89 )  |
| 15. 第四次电渣重熔法国际性会议.....       | ( 100 ) |
| 16. 佛思·布劳恩的电渣重熔.....         | ( 102 ) |
| 17. 瑞典引进电渣重熔设备.....          | ( 102 ) |

1726/21



841486

# 电渣重熔钢的特点

从大规模应用电渣重熔法至今，还不到十年，而其应用范围与真空电弧重熔法已没有太大的差别了。它的特点是在不需要真空装置的条件下把作为钢中非金属夹杂物的氧去除，进而能够通过重熔将钢铁材料中的有害元素硫去除。因此，该法迅速普及，非常吸引人。如在苏联已经安装了年产数十万吨钢的电渣重熔设备，在英国已于1967年建成了直径为122厘米的电渣重熔炉，西德也于1971年建成了生产直径为2500毫米的钢锭的电渣重熔炉，其钢锭重量可达160~200吨。在日本已经有十几座电渣重熔炉投产，最大的为50吨，日本三菱制钢公司的8吨电渣重熔炉已经投产2年了。

## 电渣重熔钢的优点

1. 钢锭的凝固速度及凝固方向可以控制，钢锭的偏析最少，而且没有环状偏析，钢锭组织的均匀性显著得到改善；

2. 钢锭的重量增大，减少钢锭保温帽的损失，电渣重熔钢钢锭表面平滑。钢的高温加工性能得到改善，提高了钢锭的收得率；

3. 重熔工艺容易掌握，发生变化也易于适应；电极及钢锭的形状不受限制，可以由电渣重熔法生产空心及其他形状的成品；

可以使用多电极及复合电极；

4. 电渣重熔钢的夹杂物最小，钢的清淨度提高；钢具有良好的抗磨性能及良好的抗热疲劳性能；钢质十分均匀；

5. 电渣重熔钢的脱硫及脱氧可以控制；并可以防止挥发性合金元素的挥发；可以调整钢中微量合金元素的含量。

此外，钢锭的密度，疏松度也都良好，电渣重熔钢钢锭不仅比普通钢锭好，而且在某些方面比真空电弧重熔钢锭还好。

## 电渣重熔钢的性质

### 电渣重熔时化学成分的变化

为了分析电渣重熔法引起的钢的化学成份的变化，以直径为100毫米的电极，用真空电弧重熔(真空度为 $5 \times 10^{-2}$ 托尔)、电渣重熔及电子束熔炼(真空度为 $10^{-3}$ 托尔)，熔制了直径约为150~200毫米的钢锭，其钢种为包括锻造钢在内的五种钢，锻造钢的化学成份为0.56% C、17%Ni、1%Cr、0.5%Mo。将试验钢锭制成锻造比为8~10的试验钢材，记录其化学成

份的变化、机械性能试验结果及钢的清淨度。表 1 所示的是试验钢在重熔前后化 学 成 份 的 变化。

对三种重熔方法来说, 钢中含碳量在重熔前后的变化很小, 除 347 系不锈钢外含硅量在电渣重熔后有显著的减少外。所有钢种的含锰量在重熔后都降低了, 其中以电子束重熔法减少的最为显著。钢中含磷量在重熔前后的变化很小, 电渣重熔法脱硫显著。电渣重熔前后钢中含氮量几乎没有什么变化。但真空电弧重熔钢较电子束重熔钢的钢中含氮量显著降低, 真空电弧重熔及电子束重熔的脱氧度大于电渣重熔法。对三种重熔方法来说, 钢中主要合金元素 Ni、Cr、Mo、Nb、V 及 Cu 和 Sn 的含量在重熔前后几乎没有什么变化。

合金工具钢的化学成份在电渣重熔后的变化如表 2 所示。

钢 在 重 熔 前 后 化 学 成 份 的 变 化

表 1

|    |            | C     | Si   | Mn   | [P]   | S     | N*  | O*  | Ni    | Cr    | Mo   | Nb   | V    | Cu   | Sn    |
|----|------------|-------|------|------|-------|-------|-----|-----|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| 1. | 原 钢        | 0.55  | 0.39 | 0.66 | 0.014 | 0.009 | 120 | 58  | 1.66  | 1.06  | 0.45 | —    | 0.09 | 0.10 | 0.015 |
|    | 锻造用钢 VAR*  | 0.55  | 0.39 | 0.59 | 0.014 | 0.010 | 96  | 16  | 1.67  | 1.09  | 0.47 | —    | 0.10 | 0.10 | 0.013 |
|    | EBM*       | 0.56  | 0.37 | 0.19 | 0.010 | 0.007 | 75  | 20  | 1.67  | 1.02  | 0.47 | —    | 0.08 | 0.06 | 0.010 |
|    | ESR*       | 0.58  | 0.26 | 0.60 | 0.014 | 0.006 | 123 | 28  | 1.63  | 1.06  | 0.45 | —    | 0.09 | 0.10 | 0.015 |
| 2. | 原 钢        | 0.34  | 0.72 | 0.65 | 0.012 | 0.008 | 120 | 55  | 0.23  | 1.37  | 0.53 | —    | —    | 0.11 | 0.013 |
|    | 结构用钢 VAR*  | 0.35  | 0.73 | 0.53 | 0.012 | 0.010 | 98  | 18  | 0.23  | 1.31  | 0.55 | —    | —    | 0.10 | 0.012 |
|    | EBM*       | 0.35  | 0.76 | 0.24 | 0.011 | 0.010 | 90  | 19  | 0.23  | 1.38  | 0.55 | —    | —    | 0.08 | 0.010 |
|    | ESR*       | 0.37  | 0.46 | 0.65 | 0.013 | 0.008 | 112 | 22  | 0.22  | 1.41  | 0.52 | —    | —    | 0.10 | 0.013 |
| 3. | 原 钢        | 0.17  | 0.18 | 0.21 | 0.010 | 0.012 | 77  | 40  | 2.86  | 1.35  | 0.34 | —    | —    | 0.12 | 0.014 |
|    | 结构用钢 VAR*  | 0.12  | 0.16 | 0.14 | 0.010 | 0.013 | 63  | 8   | 2.91  | 1.34  | 0.34 | —    | —    | 0.11 | 0.012 |
|    | EBM*       | 0.14  | 0.16 | 0.06 | 0.009 | 0.015 | 56  | 9   | 2.72  | 1.33  | 0.32 | —    | —    | 0.07 | 0.009 |
|    | ESR*       | 0.14  | 0.19 | 0.16 | 0.010 | 0.011 | 65  | 52  | 2.9   | 1.32  | 0.32 | —    | —    | 0.13 | 0.014 |
| 4. | 原 钢        | 0.10  | 0.53 | 0.71 | 0.021 | 0.011 | 610 | 160 | 8.93  | 17.5  | —    | —    | —    | 0.11 | 0.012 |
|    | 奥氏体不 VAR*  | 0.075 | 0.52 | 0.62 | 0.022 | 0.007 | 563 | 41  | 8.86  | 17.56 | —    | —    | —    | 0.11 | 0.010 |
|    | 锈钢 EBM*    | 0.074 | 0.48 | 0.24 | 0.015 | 0.010 | 363 | 31  | 8.9   | 17.30 | —    | —    | —    | 0.06 | 0.008 |
|    | ESR*       | 0.08  | 0.35 | 0.67 | 0.022 | 0.009 | 640 | 40  | 9.06  | 17.50 | —    | —    | —    | 0.11 | 0.012 |
| 5. | 原钢(1)      | 0.055 | 0.36 | 1.45 | 0.029 | 0.012 | 340 | 85  | 10.81 | 17.77 | 0.18 | 0.66 | —    | 0.14 | 0.015 |
|    | 奥氏体不 原钢(2) | 0.05  | 0.43 | 1.35 | 0.014 | 0.009 | 350 | 21  | 11.3  | 18.22 | 0.27 | 0.70 | —    | 0.15 | 0.014 |
|    | 锈钢 VAR     | 0.060 | 0.44 | 4.35 | 0.013 | 0.013 | 390 | 9   | 11.9  | 18.49 | 0.30 | 0.76 | —    | 0.14 | 0.015 |
|    | EBM        | 0.057 | 0.41 | 0.41 | 0.015 | 0.011 | 263 | 13  | 11.25 | 18.58 | 0.30 | 0.76 | —    | 0.09 | 0.011 |
|    | ESR        | 0.053 | 0.36 | 1.32 | 0.026 | 0.008 | 350 | 37  | 10.9  | 17.6  | 0.15 | 0.62 | —    | 0.15 | 0.014 |

※ N\*, O\*: 单位为百万分之一, 即  $10^{-6}$ ; VAR: 真空电弧重熔; EBM: 电子束重熔;

ESR: 电渣重熔; 原钢(1): 电渣重熔用钢; 原钢(2): 真空电弧重熔及电子束重熔用钢。

电渣重熔对合金工具钢化学成分变化的影响(直流平均%)

表 2

|     |       | C     | Si       | Mn       | P | S        | Cr    | W | Mo | Co | V     |
|-----|-------|-------|----------|----------|---|----------|-------|---|----|----|-------|
| 高速钢 | T—型   | 0     | -15, -25 | -10, -15 | 0 | -30, -40 | 0     | 0 | 0  | 0  | 0, -3 |
|     | M—型   | 0     | -30, -45 | -5, -15  | 0 | -30, -50 | 0     | 0 | 0  | 0  | 0, -3 |
|     | 加硫M—型 | -3    | -15, +5  | -20, -30 | 0 | 0, -10   | 0     | 0 | 0  | 0  | 0, -3 |
| 热轧钢 | Cr基   | 0     | -10, -20 | 0        | 0 | -40, -60 | 0     | 0 | 0  | —  | 0, -3 |
|     | W基    | 0     | -15, -25 | -10, -15 | 0 | -30, -50 | 0     | 0 | 0  | —  | 0, -3 |
| 冷轧钢 | A—型   | 0     | -10, -20 | 0        | 0 | -40, -50 | 0     | 0 | 0  | —  | —     |
|     | D—型   | 0, -5 | -20, -30 | 0, -10   | 0 | -40, -50 | 0, -2 | — | 0  | 0  | 0, -3 |

※ 钢含氮量没有变化;

钢中含氧量一般减少20~50%;

钢中含磷量有时增加10%

电渣重熔钢中的C、P、N、Cr、Mo、W、Co及V的含量没有变化或几乎没有减少, 钢中含硅量的变化一般在10%以上, 钢中含锰量的变化约为10%, 钢中含硫量减少30%以上, 钢中含氧量减少20~50%, 钢中含磷量有时增加10%左右。

表3所示的是12%Cr马氏体不锈钢在电渣重熔后的化学成份的变化, 钢中Si和Mn有若干减少, 并显示出高的脱硫率。

表4所示的是18Ni马氏体时效钢用70%的CaF<sub>2</sub>, 30%的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>渣进行电渣重熔时的化学成份的变化。

一般重金属元素几乎不发生变化, 具有较大时效作用的Ti和Al有所变化, 其中Ti的降低非常显著。

电渣重熔钢锭化学成份的变化具有如下的倾向:

Si、Mn、S、O、Ti……减少

440C 钢 的 化 学 成 份 (%)

表 3

|       | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cu   | Ni    | Cr    | Mo   |
|-------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| 电 极   | 0.98 | 0.44 | 0.57 | 0.029 | 0.017 | 0.08 | 0.24  | 16.90 | 0.39 |
| 电渣重熔钢 | 1.01 | 0.41 | 0.56 | 0.027 | 0.009 | 0.08 | 0.524 | 16.45 | 0.38 |

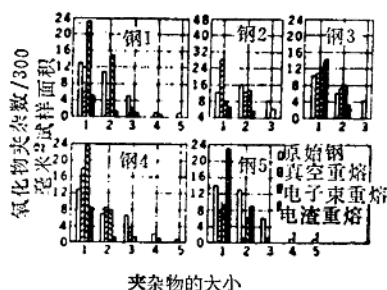


图 1 重熔方法对氧化物系夹杂物的数量和大小影响

C、N及重金属元素……不变化；

P……一般不发生变化。

电极表面状况对钢锭成份的影响

表 4

| 重熔序号※ | 电极表面状况 | 气 氛 | 重 熔 条 件 |       |              |              | 化 学 成 份, % |      |      |      |       |       |       |
|-------|--------|-----|---------|-------|--------------|--------------|------------|------|------|------|-------|-------|-------|
|       |        |     | 电流, 安   | 电压, 伏 | 重熔速度<br>公斤/分 | 电耗,<br>千瓦时/吨 | C          | Ti   | Al   | Si   | S     | O     | N     |
| 1 E   | 铸 造    | 大 气 | 2300    | 35    | 0.95         | 1430         | 0.019      | 0.33 | 0.12 | 0.14 | 0.008 | 0.008 | 0.004 |
| T     |        |     |         |       |              |              | 0.017      | 0.15 | 0.08 | 0.13 | 0.603 | 0.008 | 0.005 |
| M     |        |     |         |       |              |              | 0.017      | 0.15 | 0.03 | 0.13 | 0.003 | 0.003 | 0.004 |
| B     |        |     |         |       |              |              | 0.019      | 0.13 | 0.10 | 0.14 | 0.003 | 0.009 | 0.004 |
| 2 E   | 表面喷砂处理 | 大 气 | 2150    | 36    | 1.0          | 1310         | 0.022      | 0.31 | 0.05 | 0.12 | 0.009 | 0.025 | 0.005 |
| T     |        |     |         |       |              |              | 0.021      | 0.12 | 0.06 | 0.12 | 0.005 | 0.008 | 0.004 |
| M     |        |     |         |       |              |              | 0.021      | 0.11 | 0.06 | 0.11 | 0.003 | 0.009 | 0.004 |
| B     |        |     |         |       |              |              | 0.022      | 0.11 | 0.08 | 0.12 | 0.003 | 0.009 | 0.007 |

※ E, 电极; T, 头部; M, 中部; B, 底部;

图 1 所示的是重熔方法对钢中氧化物系夹杂的数目和大小的影响。与原钢锭相比, 电渣重熔、真空电弧重熔及电子束重熔的钢锭的清洁度都得到改善, 钢中大型夹杂物减少。可以看出, 除表 1 中钢种五 (347 系不锈钢) 之外, 电渣重熔钢钢锭的清洁度比其他钢锭的清洁度为好。电渣重熔钢中的硫化物系夹杂也同样为少。

表 5 所示的是 12%Cr 马氏体不锈钢的清洁度。电渣重熔钢和真空电弧重熔钢比一般方法冶炼的钢的清洁度要好。对硫化物夹杂来说, 电渣重熔钢好, 而对  $Al_2O_3$  系夹杂和球状氧化物夹杂来说真空电弧重熔钢为好。

由 ASTM-D 法冶炼的马氏体不锈钢的清洁度

表 5

| 类 型<br>冶炼方法 | A   |     | B   |     | C |   | D   |     |
|-------------|-----|-----|-----|-----|---|---|-----|-----|
|             | T   | H   | T   | H   | T | H | T   | H   |
| 普通方法        | 2.5 | 1.0 | 2.0 | 1.0 | 0 | 0 | 2.0 | 1.5 |
| 真空电弧重熔      | 1.5 | 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 1.0 | 1.0 |
| 电渣重熔        | 1.0 | 0   | 1.5 | 0   | 0 | 0 | 1.5 | 1.0 |

注: A, 硫化物; B, 氧化铝; C, 硅酸盐; D, 氧化物。

用电炉冶炼的不锈钢中和用电渣重熔炉冶炼的不锈钢中的氧, 硫的含量及其非金属夹杂物之间的关系如图 2 及图 3 所示。由这两个图可以看出, 当用两种不同方法冶炼的不锈钢中的氧及硫含量相同时, 电渣重熔钢的清洁度要好于电炉钢。

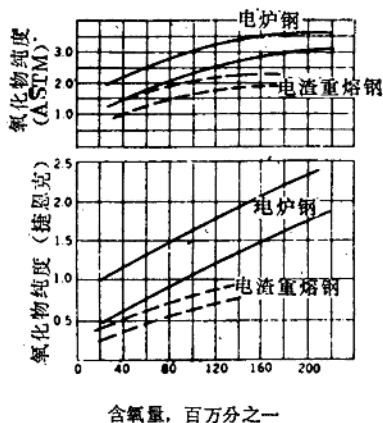


图2 用电炉及用电渣重熔炉冶炼的不锈钢的含氧量和清洁度的关系。

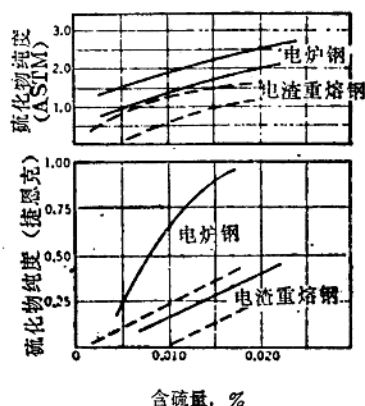


图3 用电炉及用电渣重熔炉冶炼的不锈钢的含硫量和清洁度的关系。

### 偏析

众所周知，偏析是钢水凝固过程中不可避免的一种缺陷，钢锭越大，其偏析程度也愈大。图4所示的是比较大的电渣重熔钢锭的偏析情况，其钢锭尺寸为750毫米(直径)×1400毫米(长)。用真空浇铸钢锭做电极进行电渣重熔，而重熔钢锭用来制造‘低压透平机转子轴，其成份为2.2%Ni, 1.2%Cr, 0.37%Mo, 0.07%V。

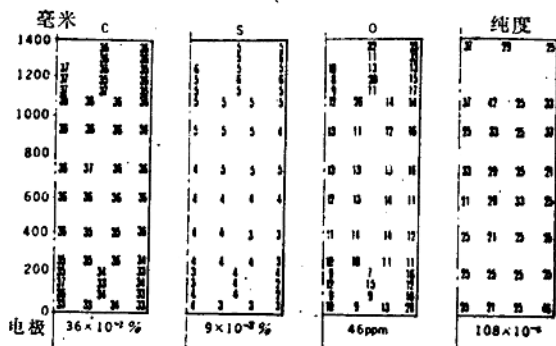


图4 750毫米直径电渣重熔钢锭的偏析

图4仅只是比较了对普通钢锭来说容易偏析的元素，电渣重熔锭与电极相比，除由脱硫作用而使钢之纯净度提高外，对所有元素来说，在钢锭内、外部及头部、底部的含量几乎没有什么不同。

图5所示的是3%Cr-Mo钢转子轴的成份分布状况，它是由10吨重的电渣重熔锭制成的，其轴身直径为925毫米，长度为3870毫米。对普通钢锭来说，即使是呈现出很强偏析倾向的C, P及S等元素，在电渣重熔锭的头部和低部，内部和外部的含量也几乎没有什么不同。

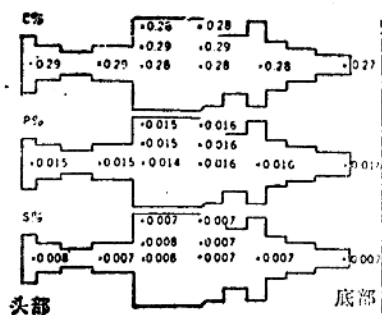


图 5 3%Cr—Mo钢的化学成份分布状况

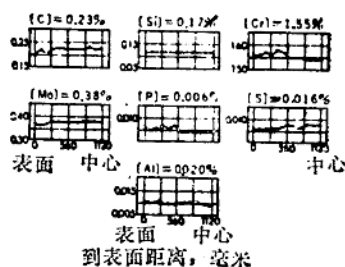


图 6 直径为2300毫米，重量为60吨的电渣重熔钢的化学成份分布状况

图6，图7，图8所示的是直径为2300毫米的26Ni—Cr—Mo145电渣重熔钢的偏析状况。



图 7 直径为2300毫米，重量为60吨的电渣重熔钢的氧及氮的分布

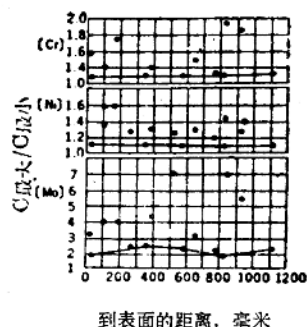
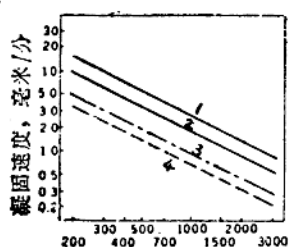


图 8 电渣重熔钢和普通钢的偏析系数

电渣重熔钢中的Si、S、Al的含量与电极相比，除有所减少外，不同部位的含量几乎没有什么变化。对这样大的钢锭来说，从锭表面至锭中心其含量的波动非常小，钢锭中含氧量为12~25/10<sup>6</sup>（重量比），其结果是良好的。图8所示的是用电子探针所测定的偏析系数，由图8可以看出，除有若干的升高外（平均值为2.2），钢中Ni、Cr含量降低，与普通钢锭相比，偏析明显地减少。

可以肯定，上述结果是由于普通钢锭和电渣重熔钢锭的凝固状况不同而造成的，图9所示的是电渣重熔钢锭和普通钢锭的直径和凝固速度的关系，由于直径为1000毫米的电渣重熔钢锭的凝固速度只相当于直径为300毫米的普通钢锭的凝固速度，所以电渣重熔钢锭的偏析程度小也是可以理解的了。另外，钢水凝固速度大也是树枝状结晶枝间距离小的一个原因。

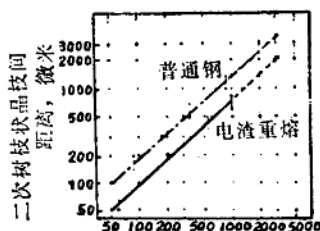
图10所示的是电渣重熔钢和普通钢锭中心的二次树枝状结晶的枝间距离随钢锭直径的变化。由图可知，直径为1000毫米的电渣重熔钢锭的树枝晶枝间距离基本相当于直径为300毫米的普通钢锭的树枝晶枝间距离，这与图9所示的结果是一致的。



钢锭直径, 毫米

1. 电渣重熔锭中央半径; 2. 电渣重熔锭中心;
3. 普通钢锭中央半径; 4. 普通钢锭中心

图 9 电渣重熔钢锭和普通钢锭的直径和凝固速度的关系



钢锭直径, 毫米

图10 电渣重熔钢锭和普通钢锭中心的二次树枝晶枝间距离

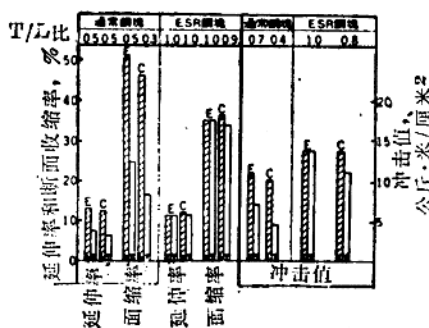
## 机 械 性 能

表 6 所示的是用表 1 所示的化学成份冶炼的各种钢的机械性能。真空电弧重熔, 电子束重熔及电渣重熔钢的纯净度与原钢相比得到显著改善, 而其改善程度以电渣重熔钢为大, 用下式来表示机械性能的各向异性:

$$\frac{1}{2} \left( \frac{\text{纵向试样的面缩率}}{\text{横向试样的面缩率}} + \frac{\text{纵向试样的冲击值}}{\text{横向试样的冲击值}} \right)$$

电渣重熔的各向异性率约为 1, 与普通钢相比, 其各向异性率为小。这一效果在 H11 耐热工具钢中明显地显示出来。

图11所示的是电渣重熔对H11钢的延性及冲击值的影响。



钢锭尺寸, 500毫米直径

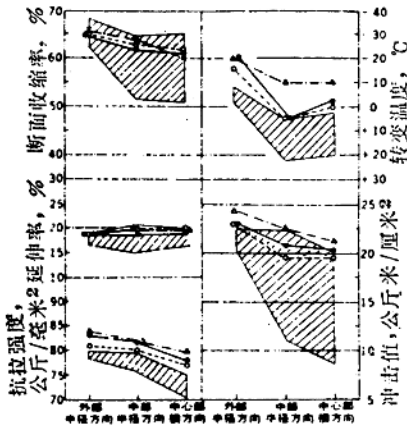
E, 端缘部分; C, 中心部分; L, 纵向; T, 横向

图11 电渣重熔对耐热工具钢的延性及冲击值的影响

用 T/L 来表示钢的各向同性, 普通钢锭的端部、边缘部、中心部的延伸率、面缩率的等向性值不超过 0.5, 而电渣重熔钢锭的等向性值基本为 1.0。钢的冲击值也表现出与表 6 所示

的值相同的倾向。

图12所示的是3%Cr-Mo钢大钢锭的机械性能。图中阴影部份是普通钢锭试样的测定结果。从普通钢锭的四周部所取钢样的机械性能的波动小，但其钢锭内部所取钢样机械性能的波动变大，其波动程度以韧性为大，而缩率的波动约为15%，冲击值的波动约为10公斤·米/厘米<sup>2</sup>，但电渣重熔钢的机械性能的波动较小，而缩率约为3%，冲击值不过约为2.5公斤·米/厘米<sup>2</sup>，可以看出，电渣重熔钢的可靠性为高。图13所示的是直径为2000毫米，高为600毫米的25Ni-Cr-Mo1452电渣重熔钢锭圆板的锻造效果和机械性能。



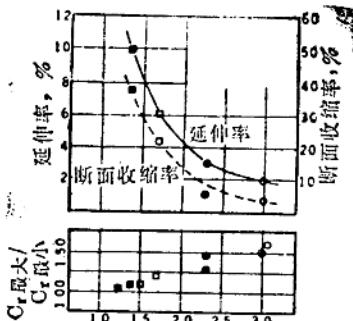
取样位置及取样方向

●钢锭头部；○钢锭中部；△钢锭底部；

图12 从钢锭内、外部所取横向钢样的机械性能

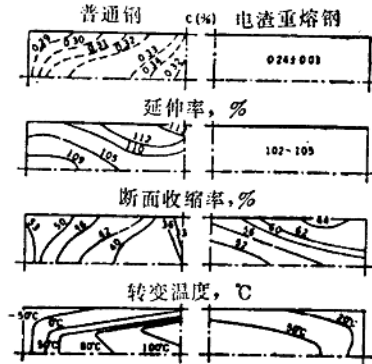
对普通钢来说，其圆片试样内、外部的含碳量的波动值为0.05%，而电渣重熔钢仅为0.01%。由于这种偏析的结果及热处理条件的影响，而使得抗拉强度、面缩率及转变温度发生波动，电渣重熔钢的均匀性是显而易见的。

图14所示的是H11钢中Mo的微观偏析对钢的韧性的影响，钢中Mo的微观偏析度越小，则钢之延伸率及面缩率愈高，所取钢样为普通钢和电渣重熔钢的铸态样和热加工后的试样。



Mo的微观偏析 (最大M<sub>0</sub>/M<sub>0</sub>最小)

图14 H11钢Mo的微观偏析对横向延伸及面缩率的影响



普通钢电渣重熔钢

图13 普通的25Ni-Cr-Mo1425钢与电渣重熔的25Ni-Cr-Mo1425钢机械性能的比较

- 电渣重熔钢铸态试样
- 电渣重熔钢热加工试样
- 普通钢铸态试样
- 普通钢热加工试样

锻造成形比为4，抗拉强度为165公斤/毫米<sup>2</sup>

普通钢重熔前、后的机械性能

表 6

| 钢 种              |     | 纵 向   |                                |               |           |                                   | 横 向                            |              |          |                                   |                |
|------------------|-----|-------|--------------------------------|---------------|-----------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------|----------|-----------------------------------|----------------|
|                  |     | 纯净度   | 60.2<br>公斤/<br>毫米 <sup>2</sup> | 延伸率,<br>5d(%) | 面缩率,<br>% | 冲 击 值<br>公斤·<br>米/厘米 <sup>2</sup> | 60.2<br>公斤/<br>毫米 <sup>2</sup> | 延伸率<br>5d(%) | 面缩率<br>% | 冲 击 值<br>公斤·<br>米/厘米 <sup>2</sup> | 机械性能的<br>各向异性值 |
| 1.<br>锻造用钢       | 原钢  | 140.0 | 149.0                          | 10.8          | 41.9      | 2.9                               | 133.8                          | 7.5          | 12.1     | 1.4                               | 2.83           |
|                  | VAR | 69.3  | 168.5                          | 9.3           | 39.9      | 2.7                               | 162.6                          | 6.5          | 21.9     | 2.1                               | 1.53           |
|                  | EBM | 79.0  | 186.4                          | 11.5          | 45.5      | 3.6                               | 155.5                          | 9.7          | 33.3     | 2.6                               | 1.38           |
|                  | ESR | 31.5  | 157.0                          | 10.9          | 38.9      | 3.3                               | 151.4                          | 10.0         | 34.9     | 3.04                              | 1.10           |
| 2.<br>结构用钢       | 原钢  | 191.0 | 102.9                          | 17.1          | 62.4      | 10.0                              | 110.8                          | 11.8         | 39.9     | 4.0                               | 2.02           |
|                  | VAR | 175.5 | 102.7                          | 17.0          | 62.4      | 7.8                               | 112.5                          | 15.4         | 51.0     | 5.7                               | 1.3            |
|                  | EBM | 59.5  | 97.5                           | 17.4          | 63.0      | 9.3                               | 106.4                          | 14.0         | 46.2     | 4.8                               | 1.7            |
|                  | ESR | 23.0  | 98.5                           | 16.5          | 63.0      | 12.2                              | 110.5                          | 14.0         | 50.0     | 11.0                              | 1.9            |
| 3.<br>结构用钢       | 原钢  | 64.5  | 59.4                           | 24.1          | 76.8      | 22.6                              | 66.4                           | 21.4         | 63.9     | 11.0                              | 1.48           |
|                  | VAR | 39.0  | 52.8                           | 26.3          | 78.2      | 26.5                              | 66.4                           | 24.3         | 75.0     | 21.4                              | 1.14           |
|                  | EBM | 39.5  | 54.0                           | 26.4          | 78.9      | 32.6                              | 67.7                           | 26.5         | 76.7     | 29.0                              | 1.09           |
|                  | ESR | 28.0  | 55.4                           | 25.5          | 76.8      | 24.0                              | 65.4                           | 25.1         | 75.6     | 20.0                              | 1.08           |
| 4.<br>奥氏体不<br>锈钢 | 原钢  | 115.3 | 32.8                           | 59.5          | 76.2      | 30.6                              | 60.1                           | 60.7         | 64.0     | 14.5                              | 1.63           |
|                  | VAR | 81.7  | 30.6                           | 59.2          | 77.4      | 27.0                              | 63.7                           | 59.6         | 75.0     | 18.6                              | 1.24           |
|                  | EBM | 57.5  | 29.4                           | 60.9          | 76.8      | 32.0                              | 64.1                           | 58.0         | 73.3     | 24.5                              | 1.18           |
|                  | ESR | 25.5  | 28.8                           | 61.0          | 78.6      | 35.6                              | 63.6                           | 55.0         | 68.3     | 30.0                              | 1.15           |
| 5.<br>奥氏体不<br>锈钢 | 原钢  | 119.5 | 28.8                           | 49.0          | 69.0      | 20.7                              | 58.0                           | 41.5         | 30.9     | 6.3                               | 2.51           |
|                  | VAR | 29.0  | 32.5                           | 50.6          | 73.3      | 20.0                              | 60.0                           | 44.6         | 57.7     | 9.8                               | 1.66           |
|                  | EBM | 30.0  | 29.8                           | 48.6          | 73.3      | 20.0                              | 59.6                           | 40.7         | 54.3     | 11.0                              | 1.59           |
|                  | ESR | 47.0  | 31.2                           | 48.3          | 72.0      | 20.5                              | 58.8                           | 49.6         | 63.2     | 9.8                               | 1.61           |

这不仅说明电渣重熔钢的韧性优于普通钢，而且标志着电渣重熔钢在小的锻造比的条件下就能获得相当的韧性值，即可以使钢锭的尺寸接近于所要锻造的部件的尺寸，这样一来，锻造加工费用可以节约。

## 经 济 情 况

图15所示的是在一般情况下，电渣重熔钢与普通钢收得率的比较。AISI440C 钢的电渣重熔钢比用感应电炉熔炼的AISI440C 钢的热加工性能为好。图15中阴影部分为收得率随制品形状的波动，电渣重熔钢的收得率随钢锭的高(L)和直径(D)的比L/D而变化。对普通钢来说，当钢锭重量小于5吨时，其收得率增加，钢锭重量为5~30吨时，其收得率不变，

当重量超过30吨时，其收得率急剧减少，300吨重的钢锭的收得率约为65%。但电渣重熔钢锭不超过50吨时，其收得率几乎不变，钢锭超过50吨时，收得率逐渐降低，而300吨重的电渣重熔钢锭的收得率约为85%，与普通钢钢锭相比，电渣重熔钢的收得率平均高15%。

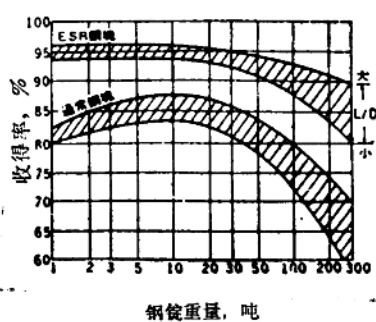


图15 电渣重熔钢锭与普通钢锭收得率的比较

图16所示的是电渣重熔钢和普通钢的锻造及退火周期的比较。当用同一钢种（3%Cr—Mo 钢）来制造低压透平转子轴时，电渣重熔钢锭的重量仅为普通钢锭重量的1/2，在锻造一次条件下，其退火时间比普通钢可节约1/2以上。但是若电极制造，电渣重熔等费用超过上述优点的节约费时，则电渣重熔优越性的发挥不得已要受到限制。

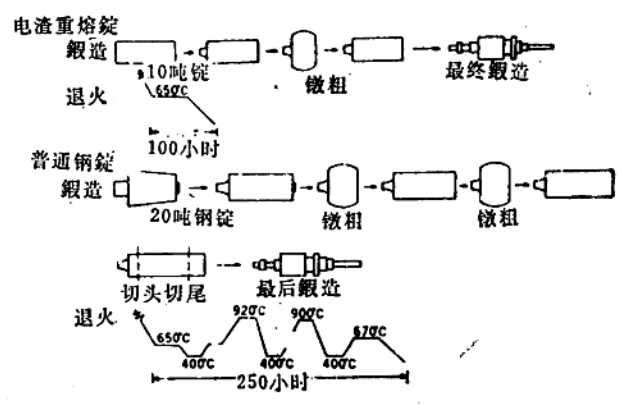


图16 电渣重熔钢和普通钢的锻造及退火周期的比较

表7所示的是电渣重熔钢与普通钢的成本。而图17所示的是电渣重熔钢与普通钢生产成本之比随制成品重量的变化。电渣重熔钢和普通钢的机械加工费几乎相等，锻造费和报废率电渣重熔钢远远为低，但其材料费为高。当重熔费为450马克/吨时，若制成品的重量为20吨，则电渣重熔钢与普通钢的生产成本几乎相等，当制成品重量超过100吨时，电渣重熔钢的生产成本可降低5%。

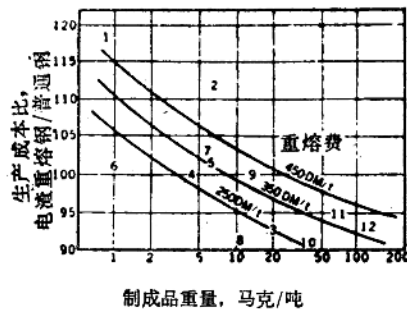


图17 电渣重熔钢相对于普通钢的生产成本的变化。

典型锻钢件成本的比较（电渣重熔钢报废率为普通钢的一半）

表 7

| 锻 钢 件    | 材 料             | 锻 钢 成 品  |             | 电渣重熔钢各工序生产费（以普通钢为 100） |     |      |     |            |     |     |
|----------|-----------------|----------|-------------|------------------------|-----|------|-----|------------|-----|-----|
|          |                 | 重量,<br>吨 | 价格,<br>马克/吨 | 重熔费为450马克/吨时           |     |      |     | 总重熔费, 马克/吨 |     |     |
|          |                 |          |             | 材 料                    | 锻 造 | 机械加工 | 报 废 | 250        | 350 | 450 |
| 1. 400圆钢 | X20Cr13         | 1.5      | 1654        | 162                    | 98  | 100  | 66  | 112        | 119 | 126 |
| 2. 车轮    | 100Cr6          | 6.7      | 3750        | 177                    | 99  | 100  | 57  | 108        | 113 | 118 |
| 3. 车轮    | X5Cr—Ni1819     | 20.2     | 10450       | 106                    | 96  | 100  | 65  | 90         | 93  | 96  |
| 4. 冷轧机轧辊 | 80Cr7           | 4.5      | 5400        | 163                    | 46  | 100  | 68  | 97         | 100 | 103 |
| 5. 轮压机辊子 | 65Cr6           | 7.7      | 7500        | 172                    | 48  | 98   | 50  | 98         | 100 | 102 |
| 6. 转子    | X20Cr-Mo-V12)   | 1        | 7150        | 142                    | 84  | 96   | 57  | 98         | 101 | 104 |
| 7. 转子    | 25Ni-Cr-Mn-14.5 | 8        | 5700        | 140                    | 71  | 100  | 57  | 97         | 101 | 105 |
| 8. 转子    | 28Ni-Cr-Mo7.4   | 11       | 7050        | 120                    | 30  | 100  | 41  | 84         | 90  | 96  |
| 9. 转子    | 25Ni-Cr-Mn14.5  | 15       | 5400        | 136                    | 69  | 100  | 57  | 96         | 100 | 104 |
| 10. 转子   | 38Ni-Cr-Mo7.4   | 44       | 5950        | 119                    | 60  | 100  | 53  | 87         | 91  | 97  |
| 11. 转子   | 38Ni-Cr-Mo7.4   | 68       | 5400        | 136                    | 57  | 100  | 55  | 90         | 94  | 99  |
| 12. 转子   | 38Ni-Cr-Mo7.4   | 117      | 6600        | 125                    | 81  | 100  | 54  | 89         | 93  | 97  |

假若重熔成本能进一步降低的话，则电渣重熔钢的经济性可以进一步的提高。

因此，当以电渣重熔钢来生产机械构件时，为了与普通钢竞争，则需尽可能地使重熔费降低，并生产出各向同性良好的高级钢。

## 结 论

如上所述，电渣重熔钢的各种性能与普通钢相比，可以说是良好的，但它仍有以下的缺点：

1. 生产工艺与普通钢相比相当复杂；

2. 需向电极供给大量的热能；
3. 重熔费高，生产率低；
4. 不可能去除钢中之氢气，除氢需配备特殊的脱气装置；
5. 碳化物组织的改善有限制；
6. 钢之微观纯净度低于真空电弧重熔钢；
7. 为了使钢获得良好的碳化物分布，需要其锻造比与普通钢相等；
8. 需注意其化学成份的调整。

电渣重熔钢存在上述之缺点是可以解理的，上述各缺点通过适当的调整电渣重熔炉容量，电极极性或重熔之钢种，炉渣及重熔条件是可以克服的。可以预言，电渣重熔钢在普通钢的范围内占有大的比率的时代已经为时不远了。

译自：三菱制钢技报，

1973, No. 1, 45~54.

# 电渣重熔时氧的行为

在 $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-(FeO)}$ 液系中, 钢和渣成分对电渣重熔钢中含氧量的影响。阐述了在电渣重熔条件下, 含 $\text{CaF}_2$ 渣中 $\text{FeO}$ 的相分离趋势, 得出了重熔时钢和渣吸氧时的速度最慢的反应步骤。

由于电渣重熔法的优越性——可以控制反应过程、脱硫能力较大、可控制一次再结晶、重熔钢锭的纯度较高、成本较低——近来获得愈来愈广泛的应用。

基于 $\text{CaF}_2$ 有良好的导电率、较低的熔点和较低的粘度, 所有电渣重熔时几乎都用含有 $\text{CaF}_2$ 的混合物作为熔渣的主要组分。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CaO}$ 用来作为添加物。在重熔过程中, 上述熔渣及重熔的钢液通过下述途径吸收氧气: 吸收熔解在电极中的氧气; 直接接触渣面处的电极表面的氧化作用及随后氧化层熔解在渣中; 通过渣-气相界面上的吸附作用, 氧从气相转移到渣中。

渣所吸收的氧化合成二价或三价的铁氧化物形式。渥尔逊等人在铁制坩埚中所进行的实验表明, 在 $\text{CaF}_2\text{-FeO}$ 渣系中, 二价铁氧化物存在着特殊的溶解趋势。往 $\text{CaF}_2\text{-FeO}$ 渣系中加入少量的石灰或硅酸盐, 就将大大地降低 $(\text{FeO})$ 的活度。升高温度有同样的影响。

然而, 电渣重熔低合金结构钢时, 尚不能确定出 $(\text{FeO})$ 的活度同熔渣成分之间的关系。很显然, 电渣重熔时必须注意钢的成分。根据平衡计算和氧分析, 皮扎克等人假定, 在铝、硅、锰含量较高的情况下, 可以通过这些元素的活度测定出电渣重熔锭中的含量。霍兹格鲁布等人认为, 电渣重熔时, 甚至可以得到硅脱氧的平衡值。

本文就是研究未饱和的 $\text{CaF}_2$ 熔渣对电渣重熔条件下氧的行为的影响。此外, 还将从实验结果和众所周知的某些炼钢方法的反应机理, 推断出电渣重熔法的反应过程和速度确定电渣重熔法中吸氧速度的一些步骤。

## 实 验 过 程

能够在固定和稳定条件下的塔曼炉中研究未饱和含 $\text{CaF}_2$ 熔渣。但是, 在寻求 $1700\sim 1800^\circ\text{C}$ 温度下耐 $\text{CaF}_2$ 熔渣腐蚀的坩埚材料上遇到了很大的困难。所以目前都是用石墨坩埚, 在 $1500^\circ\text{C}$ 以下, 进行测定钢- $\text{CaF}_2$ 熔渣之间的平衡分布的实验。在明显的碳化气氛下, 坩埚中的石墨同熔渣发生反应产生大量碳化物, 这样就改变了渣的性能。另外, 渣上面气相中氧气的分压还不能任意选择。

在电渣重熔装置中, 熔渣不同结晶器发生反应。气相中氧气的分压可以在很宽的范围内变化。但是, 在重熔时却带来了不稳定的工作条件, 在熔渣中和金属熔池中都存在着温度梯度, 所以不能单靠温度来达到完美地控制反应。在实验性装置上只能得到一些电渣重熔的参数, 而这些数据可以换算到工业性装置上去。