

真空电弧重熔（VAR）

VAR 广泛应用于提高清洁度和细化空气熔炼或真空感应熔炼的钢锭的结构，这些钢锭成为自耗电极。VAR 钢、高温合金、钛锆及其合金用于许多高要求场合，在这些应用中，清洁度、均匀度、抗疲劳和断裂韧性对于最终产品都是必须考虑的因素。航空、发电、国防、医疗和核工业依靠这些高级重熔材料的性能。

工艺技术和工艺特点

VAR 通过真空电弧对电极进行持续重熔。应用直流电源在电极和放于水套中的钢模的底板之间产生电弧。电弧产生的高热熔化了电极，在水冷模中逐渐形成新的钢锭。整个重熔过程始终保持高真空。

VAR 炉的基本设计多年来进行了持续的改进，尤其是在计算机控制方面取得了长足的进步，全自动重熔工艺日趋成熟。从而使产品冶金学性能的重复性得到了改进。



1. 12 吨 VAR 炉

2. 30 吨 VAR 炉

真空电弧重熔工艺冶金学

VAR 钢锭中给定材料的凝固结构受局部凝固速率和在液体/固体界面处的温度梯度影响。为了得到直接的树枝状的原始结构，在整个重熔工艺中必须在凝固界面处保持较高的温度梯度。蜂窝状枝晶的生长方向与温度梯度的方向一致，也就是，凝固时在凝固界面处与热流方向一致。热流方向总是垂直于凝固界面，一旦为曲线界面，则垂直于相关切线。因此，在凝固过程中，枝晶的生长方向受金属熔池的影响。因为熔池深度与重熔速率一起增长，所以枝晶与钢锭轴线所成的生长角度也在增长。在极端情况下，直接枝晶的生长可能停止。然后钢锭心部为无方向性的凝固，例如：在等轴晶粒中导致偏析和微缩。甚至在定向凝固中，微偏析随着枝晶臂间距而增长。

与钢锭轴平行的枝晶凝固结构可产生良好的结构。但是优良的钢锭表面需要一定程度的能量输入，产生相关的重熔速率。优良的熔化速率和能量输入取决于钢锭直径和材料等级，这就意味着无法总是保持大直径钢锭所需的低重熔速率，获得与轴平行的结晶。

尽管为定向性凝固，仍可在重熔钢锭上出现缺陷，例如：“年轮”、“斑点”和“白点”等。这些缺陷将导致钢锭无用，尤其是特殊合金。

年轮形在宏观腐蚀横断面上为轻微腐蚀环。它们通常代表负晶体的偏析。年轮对材料的属性无太大的影响。它们是重熔速率较宽的波动引起的。但是在现代 VAR 装置中，利用电脑精确控制电极重量的减少和电极的给进速度，从而将重熔速率保持在所需的值，这样除非受电极缺陷影响，重熔速度将无明显的波动。

比起年轮，斑点和白点对材料性能有更大的影响。这两种缺陷为飞机引擎的涡轮盘过早损坏的主要原因。斑点为黑色腐蚀圈或近似的圆点，成分富含碳化物或形成碳化物的元素。斑点的形成通常由于较高的金属熔池深度，有时为较高的旋转熔池深度所造成。液体熔池处于离散磁场中，会发生旋转。通过保持较

低的熔池深度和对 VAR 炉进行同轴电流馈电可消除磁场干扰，来避免产生斑点。白点是 VAR 钢锭出现的典型缺陷。它们在宏观腐蚀上看起来为轻微的腐蚀点。它们在合金元素中发生率很低，例如铬镍铁合金 718 中的钛和铌。

以下几种机理可造成白点的形成：

- 钢锭中自耗电电极的未熔化枝晶残渣；
- 顶部碎片掉入金属熔池并且未溶解或重熔，内嵌入钢锭中；
- 钢锭夹持区的碎片进入钢锭里正在凝固的界面。

以上所提的三种机理可认为是白点产生的原因。这就意味着在真空电弧重熔过程中不能完全避免白点，因为它们是工艺过程中固有的。为了最大限度地减少发生频率，应遵循以下条件：

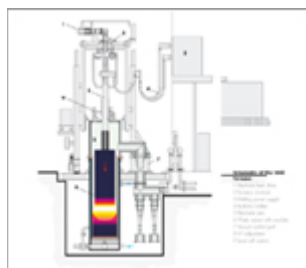
- 使用钢锭宏观结构所允许的最大可接受重熔速率；
- 利用短弧隙减少冠部形成，增加电弧稳定性；
- 利用匀质电极充分地消除空穴和裂缝；
- 利用适当的熔炼电源参数。

工艺控制

重熔参数需要闭环控制才能生产均质的钢锭，从而避免了宏观偏析，凝固结构得到控制，清洁度更高。为了符合当今最严格的材料质量规范，VAR 熔炉利用电脑控制过程自动化。逻辑控制功能、熔化电极的持续称量、工艺参数的闭环控制（例如重熔率、基于电弧电压的弧隙或短路脉冲率）、数据获得和管理都通过专用的电脑系统控制。这些电脑系统通过现场总线或特定接口进行联系。操作员接口电脑（OIP）在层次结构中作为自动熔炼控制系统（AMC）的主机，用作操作员和 VAR 工艺之间的对话界面。通过 OIP 可以实现工艺过程的可视化、具有参数指示、图形显示和用于操作者命令的软键等功能，编辑和处理重熔配方、数据接收和储存以及生成熔炼记录。作为可选，OIP 可配有以太网网络接口，用于将数据传输至与本地局域网连接的其它电脑（例如：监控电脑、客户主机等）。

所建立的重熔参数作为重熔配方储存于硬盘上，并用于结合钢锭尺寸/材料等级的后续 VAR 生产，保证冶金钢锭质量的可重复性。

ALD 自动熔炼控制系统（AMC）由于它的固有特点、易于操作以及控制的精确性和可重复性，在世界上处于领先的地位。



VAR 熔炉示意图

VAR 优势

在真空下重熔自耗电电极的主要好处在于：

- 去除溶解气，比如氢气、氮气和一氧化碳；

- 利用高金属蒸汽压力减少不需要的微量元素；
- 提高氧化物清洁度；
- 实现钢锭从底部到顶部的定向结晶，因此避免了宏观偏析并减少了微观偏析。

利用化学和物理工艺去除氧化物。氧化物和氮化物不稳定，遇热易分解或由于合金中碳的存在而减少，可通过气相去除。但是，在特种合金和高合金钢中，非金属夹杂物，例如氧化铝和碳氮化钛，却非常稳定。在重熔过程中通过浮选可去除这些夹杂物。剩下的夹杂物被分解并均匀的分布在凝固的钢锭的横断面上。

VAR 特点：

- 钢锭直径达到 1,500 mm；
- 钢锭重量达到 50 吨；
- 在真空下通过 DC 电弧熔化电极（电极负、金属池正）；
- 重熔电流至 40kA；
- 真空范围： 1– 0.1 Pa（有些场合达到 1000Pa）；
- 电极称重系统；
- 稳定或独立式的龙门架；
- 同轴大电流馈电系统；
- 根据重熔配方进行电脑控制重熔工艺（弧隙控制、熔化率控制、数据接收系统、熔炼记录的打印）。

VAR 应用：

- 用于航空航天的高温合金；
- 制造火箭加速器环和高压管的高强度钢；
- 滚珠轴承钢；
- 用于铣刀、钻头等的工具钢（冷拔钢和热轧钢）；
- 模具钢；
- 用于航空、航天、化学工业、近海技术和反应堆技术的活性金属的熔炼（钛、锆及其合金）。