

电渣重熔 (ESR)

早在 20 世纪 30 年代, ESR 就已为人所知,但是它作为公认的大批量生产高质量钢锭的工艺,却经过了约 30 年的时间。ESR 技术的优势不仅在于生产较小重量的工具钢和高温合金的钢锭,而且在于生产重型锻锭,粗锭重量可达 165 吨。



1. 16 吨 PESR 炉, 最大压力 16 bar,
2. 20 吨 ESR 炉, 能够在保护气氛中进行熔炼,
3. 165 吨 ESR 炉

工艺技术和工艺特点

VAR 需要真空进行精炼,但在 ESR 中,熔化电极浸在水冷铸模的渣池中。电流(通常为 AC)通过电极和即将成型的钢锭之间的熔渣并加热熔渣,从而金属滴在电极上熔化。熔化的金属滴穿过熔渣到达水冷铸模的底部,在这儿进行凝固。当钢锭形成后,渣池向上移动。新的精炼材料钢锭在铸模底部慢慢形成。它均匀定向地凝固,避免了中心凝固不佳,这在传统的钢锭铸造中时有发生,因为它们从外向内凝固。

一般来说, ESR 提供了非常高的、一致的和可预测的产品质量。精确控制的凝固过程,使结构完整,无缺陷。由于在钢锭和铸模壁之间形成了一层凝固的波薄渣皮,从而提高了钢锭表面的质量。这就是 ESR 被认为是生产当今工业中的高性能高温合金的首选方法的原因,例如用于航空航天、核工和和重型锻造等。所得到的都为高纯度的钢锭,这在若干年前还未听过。其它工程领域也以“高技术”先驱为榜样,坚持利用最先进和最复杂的设备通过 ESR 得到更新更高的纯度。

电渣重熔冶金

由于过热熔渣与电极端部持续接触,将在电极端部形成一层金属液膜。当正在形成的金属液穿过熔渣,利用与熔渣的化学反应或通过物理浮动至熔池顶部将清除金属内的非金属杂质使金属得到净化。在 ESR 中的剩余夹杂物尺寸很小,并且均匀的分布在重熔钢锭上。

用于 ESR 的熔渣通常主要为氟化钙 (CaF_2)、氧化钙 (CaO) 和三氧化二铝 (Al_2O_3)。有时需加入氧化镁 (MgO)、二氧化钛 (TiO_2) 和二氧化硅 (SiO_2),这取决于将要重熔的合金。为了具有所需要的功能,熔渣必须具有精确定义的属性,比如:

- 它的熔点必须高于重熔的金属的熔点;
- 必须有效节约电能;
- 它的组成必须保证能够进行所需的化学反应;
- 在重熔温度下必须有合适的粘度。

尽管为树枝状的定向凝固,在重熔的钢锭里仍会产生各种缺陷,比如年轮和斑点的形成。产生这些缺陷的原因与 VAR 相同。需要着重指出的是白点通常不会发生在 ESR 钢锭上。来自电极的枝晶骨架和小碎片必须穿过过热熔渣,在它们到达凝固面之前有足够的时间熔化,从而阻止了白点。

由渣皮覆盖的钢锭表面在锻造前无需任何整修。用于重熔的电极可用铸造最后成型。

电渣重熔炉

多年来，在装置设计、同轴电流馈电，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。从而使产品的冶金学性能得到了改进。为了阻止杂散磁场产生熔化搅动，在重熔具有偏析敏感性的合金时，需要设计完整同轴供电的炉子。

对熔炼空间进行屏蔽且处于保护性的气氛中是近年来发展的最新趋势。在加压条件下进行重熔，从而增加钢锭中的氮含量是 ESR 的另一变化。ESR 熔炉设计成可用于熔炼圆形、方形和矩形（扁形）钢锭。

最后，电脑控制工艺过程自动化的开发，操作类似于 VAR 中所描述的 ALD 自动熔炼控制系统(AMC)。在此需要着重指出的是，ALD 的电极浸入在熔渣中的深度应根据渣阻和渣阻摆动来确定。利用渣阻参数自动消除浸入深度和熔速控制回路之间的交叉影响。

ESR 所配有的 ALD 自动熔炼控制系统（AMC）因其内在特点是世界上最先进的系统，易于操作以及控制的精确度和可重复性，生产出卓越性能的钢锭，包括：

- 均匀、坚固和定向凝固结构；
- 极高的清洁度；
- 无内部缺陷（例如白点）；
- 无宏观偏析；
- 钢锭表面光滑，因而收得率高。

重型锻锭的电渣重熔

20 世纪 60 年代末，利用 ESR 装置生产大型锻锭的原理得到接受。大型发电装置日益需要重量超过 100 吨的钢锭用于制造发电机和汽轮机轴。ALD 最大的 ESR 炉于 1970 年投入使用，可以生产直径为 2300 毫米、长度为 5000 毫米、重量达 165 吨的钢锭。熔炉运行时，采用抽锭方式，利用四个熔化电极同时在大直径铸模中进行重熔，用新的电极更换熔化的电极，直到生产出所需的钢锭重量。

定向凝固必须保证覆盖整个钢锭的横截面和长度，避免产生内部缺陷，比如严重偏析、缩孔和夹杂物分布不均。只要保持正确的重熔速度和熔渣温度，对直径大至 2300 毫米的钢锭进行定向凝固也可完成。因此，尽管直径很大，ESR 钢锭仍不会产生严重偏析。与传统的铸造钢锭相比，ESR 钢锭优良的清洁度和均匀性，使其具有卓越的机械性能。



165 吨 ESR 钢锭，2,300 毫米直径 x 5,000 毫米长

工艺变化

ALD 开发出三种 ESR 工艺变化：

- 增压重熔（PESR）；
- 惰性气氛重熔（IESR）；
- 低压重熔（VAC-ESR）。

加压电渣重熔（PESR）

30 年来，氮作为低廉的合金元素用于增强钢的属性，已经日益引起人们的注意。在奥氏体钢中，氮，尤其是其溶解形态，通过形成一种超饱和固熔体来增强钢的屈服强度。对于铁素体钢等级来说，目的是形成比通过铁碳合金淬火和回火所得到的微观结构更加精细的氮的分散。生产这些新材料，基础是在常压下，将足够量的超过溶解度的氮引入钢水中，从而防止凝固过程中氮的损失。因为氮的溶解性与它的分压的平方根成正比关系，所以有可能将大量的氮引入熔化金属中，并在更高的压力下凝固。这已经通过在操作压力为 42 bar 下利用电渣重熔工艺得到证实。

由于在重熔过程中，金属滴在液相中的停留时间极为短暂，通过气相提取氮很不充分。因此，氮必须在重熔过程中持续以固态含氮添加剂形式加入。系统中的高压专门用于保留进入钢水中的氮。压力水平取决于合金的组成以及重熔钢锭所需的氮含量。

在惰性气体环境下重熔（IESR）

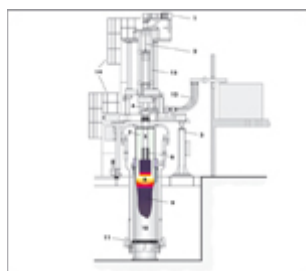
作为 ALD 在 PSER 工艺上的最新开发成果，ALD 建议在大气压下全封闭的惰性气体环境中，进行冶炼。这在解决 ESR 工艺面临的吸氢问题和大气压季节变化问题上取得了重大进展。另外，也可以在全惰性气体下进行重熔。

此方法获得以下结果：

- 完全避免了电极和熔渣的氧化；
- 完全避免了钛(Ti)、锆（Zr）、铝（Al）、硅（Si）等元素的氧化损失。这对于重熔铝钛含量较高的合金尤其重要，例如具有非常窄的分析范围的高温合金；
- 获得更高的钢锭清洁度；
- 当使用氩作为惰性气时，避免了吸氮和吸氢；（当使用氮作为惰性气时，可能吸取部分氮）。

由于在熔炉环境中缺氧，通过气相脱硫是不合适的。但在当今的钢包冶金工艺中，制造钢电极时对硫已给予充分注意。

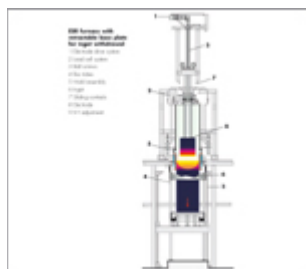
单用双熔炉概念，一个为具有相对气密性的护罩系统，一个为具有完全真空的护罩系统，用以在开始重熔工艺前用空气置换出惰性气体。



IESR 炉示意图

真空电渣重熔（VAC-ESR）

真空电渣重熔为又一最新开发的工艺。在与 VAR 类似的真空下进行重熔，但是要使用熔渣。不存在金属氧化的问题。另外，氢、氮等溶解气也可去除。在 VAR 过程中遇到的白电问题也可降至最低。因此，将 ESR 和 VAR 的优点融合于一种工艺中，非常有利于高温合金或钛的重熔。



具有可升降底板的 ESR 炉，用于抽出钢锭

熔炉类型

ALD 已经开发出五种基本的 ESR 炉概念：

试验系统

用于固定或移动铸模。该系统尤其适用于实验和试生产，以最少的投资获得多功能 ESR 的最佳性能。

固定铸模系统

具有两个固定熔炼站和一个旋转炉头。这尤其适合以极高的生产率进行高效生产。

钢锭抽出系统

具有中央抽锭熔炼站和电极交换能力，以及两个用于在固定模中进行重熔的外部熔炼站。中央站尤其适用于重熔大直径的钢锭。小直径的钢锭可在外部熔炼站同时重熔。

气氛保护系统

用于固定模，具有封闭的熔炉护罩系统，用于在惰性气体环境下进行重熔。当重熔钛（Ti）、铝（Al）和稀土合金或铝含量（< 0.005）较低的合金时，尤其推荐使用这些系统。

加压/真空系统

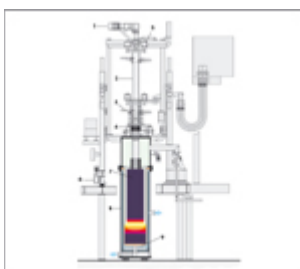
在真空、惰性气体或增压条件下进行 ESR 操作的完全密封系统。这些系统尤其适用于生产具有含氮量高或含有活性元素的 ESR 钢锭。

ESR 特点：

- 钢锭重量从 100 公斤至 165 吨；
- 交流电作为重熔能源，熔炼电流从 3kA 至 92kA；
- 钢锭直径从 170 毫米至 2,300 毫米，取决于将要重熔的材料；
- 钢锭形状可为圆形、方形和矩形；
- ALD 提供用于特殊工艺的系统，例如在加压、保护气氛或真空条件下进行 ESR 重熔。利用这些处理工艺的市场份额正在增长，尤其是在惰性气氛下的 IESR 工艺。

ESR 应用：

- 用于制造铣刀及用于矿业等的工具钢；
- 用于玻璃、塑料和汽车工业的模具钢；
- 滚珠轴承钢；
- 制造汽轮机和发电机轴的钢；
- 用于航空和汽轮机的高温合金；
- 用于化学工业的镍基合金；
- 冷轧辊。



具有固定铸模的 PSER 炉示意图