

# 惰性气体保护熔炼

—国外精铸技术进展述评(8)—

《特种铸造及有色合金》，2005（8）：476~479

众所周知，由于氢、氮、氧等气体的溶解，以及合金液表面氧化，在大气环境中熔炼和铸造，铸件中容易形成气孔、氧化夹杂等缺陷，严重损害铸件质量。防止合金液氧化、吸气的传统方法是在熔炼过程中加入熔剂覆盖熔池表面，熔炼后期脱氧、除渣。但这些方法难免会侵蚀炉衬，缩短坩埚或炉衬的使用寿命，在脱氧的同时，往往又可能产生新的非金属夹杂物。因此，人们开始寻求防止合金液氧化和吸气的新技术。

## 一. SPAL 和 LBI 法

美国 Air Liquid Co. 早在 20 世纪 70 年代，就率先研究用惰性气体覆盖保护熔池表面，防止合金液氧化、吸气的新技术，并于 80 年代先后取得法国和美国专利权。该技术采取的工艺方法大体分为二种类型：一种是液态惰气保护法——SPAL (Surface Protection Air Liquide)，另一种是惰气扩散保护法 LBI ——(Laminar Barrier Inerting)。前者基本原理是将低温液态惰性气体(如液氩或液氮)滴在熔池表面，令其迅速气化并扩散，驱赶熔池上方的空气，形成惰性气体屏障以保护合金液，其示意图见图 8-1<sup>[1]</sup>；后者则是直接将惰性气体通过层状栅栏扩散器，沿水平方向吹出，在熔池表面形成惰性气帘而保护合金液，其示意图见图 8-2<sup>[2]</sup>。

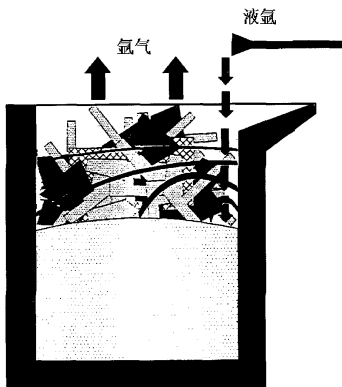


图 8-1 SPAL 法原理图

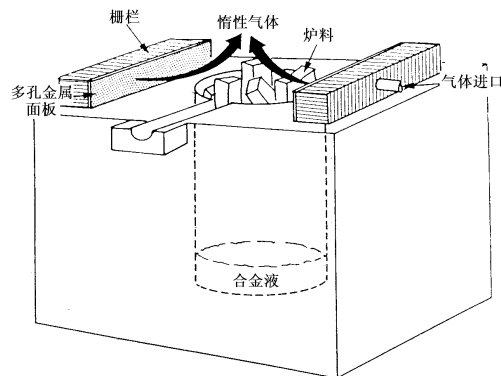


图 8-2 LBI 法原理图

## 二. 装置和设备

SPAL 工艺的装置主要包括：高压储气罐（图 8-3）<sup>[3]</sup>、气体减压分配系统和喷枪。液态惰气通过带有真空隔热套管的管道（图 8-4）<sup>[3]</sup>输送到熔池上方，再通过喷嘴（龙头）缓慢滴落到熔池表面（图 8-4 和图 8-5）。喷枪由一个单向闸阀、一个球阀和喷嘴组成（图 8-4）<sup>[3]</sup>，闸阀控制开/关，球阀控制流量。该装置使用方便，又不妨碍正常操作。当然，最好再配备一支小型便携式氧气分析仪，随时监测炉内气氛中的氧含量，以达到保护效果最佳而耗气又最少的目的。

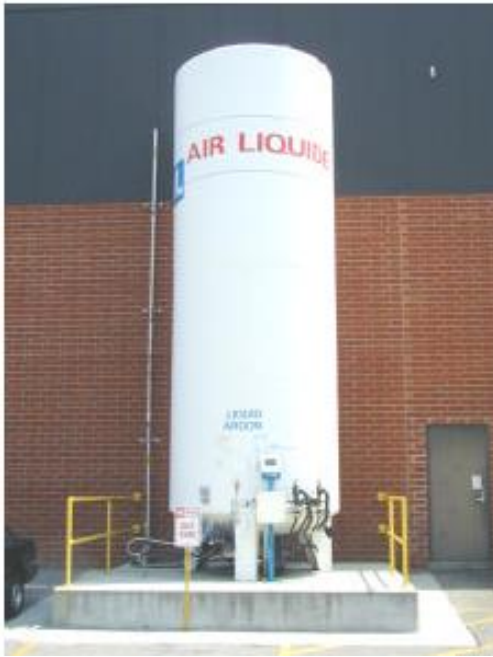


图 8-3 盛液态惰性气体的高压密闭容器



图 8-4 闸阀、球阀和输气管道



图 8-5 液氩或液氮通过喷嘴滴进熔池

### 三. 经过改进的 SPAL 和 LBI 法

无论 SPAL 还是 LBI 都有可能将熔池表面上氧气浓度降低至  $\leq 1.0\%$  (体积分数), 从而, 有效地防止合金液氧化、吸气。加之方法简便, 无论对大厂还是小厂都很有吸引力。

然而, 对于 SPAL 来说, 由于液态惰气流出后, 短时间内不可能在熔池表面均匀地分散开, 不但影响覆盖效果, 而且容易聚集在炉壁或炉渣表面的凹陷处, 造成爆炸隐患。上世纪 90 年代中期, 美国 Air Products And Chemicals Inc. 又在传统 SPAL 法的基础上进行改进, 用一种独特的喷头将液氩或液氮喷射成雾状, 形成均匀的圆锥形旋转汽雾, 笼罩在熔池上方, 这就避免了液氩聚集, 不但提高了惰性气体的利用率, 减少耗气量, 也避免了爆炸的危险, 被命名为‘涡旋汽雾法’。其工作原理示意地表示在图 8-6 中, 图 8-7 是工作现场照片<sup>[4][5]</sup>。

对于 LBI 法而言, 如果熔炉工作台上安装有抽风管道或其它除尘设备, 栅栏扩散器便无法安装、使用, 于是后来又推出了‘旋风式’气体覆盖系统。其原理是将惰性气体通过一个由耐火材料制成的圆锥或圆柱形圆环——气旋环(图 8-8), 向内侧沿切线方向吹出, 形成一股‘旋风’, 覆盖在熔池表面(图 8-9)<sup>[4][5]</sup>, 被命名为‘旋风覆盖法’。由于旋风不象气帘那样容易消散, 所以, 即使熔池上方安装有通风除尘设备, 也能照常操作。图 8-10 和图 8-11 分别是气旋环上加盖和工作现场照片<sup>[4][5]</sup>。

### 四. 覆盖方法的选择和气体流量的确定

从原则上说, 炉料中含有容易挥发(如 Mg、Li、Be 等)的元素或化学活性强, 或有毒有害元素(如 Pb、Be、Cd 等)时, 宜采用 SPAL 法。这是因为液态惰气气化的同时可令熔池表面

降温，减少 Li、Mg、Be、Cd 等合金元素的挥发和降低其化学反应活性。熔化不锈钢等铸钢，当然也可采用这种方法，但从成本和质量的角考虑，还是采用 LBI 更明智。

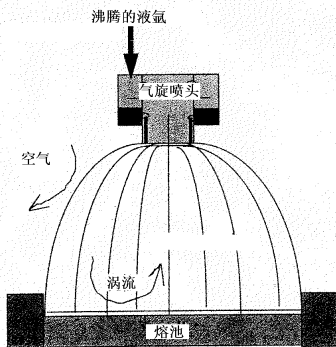


图 8-6 涡旋汽雾法原理示意图

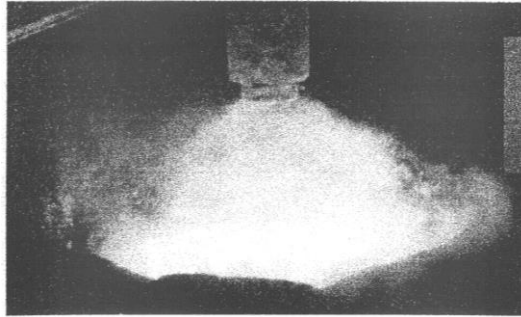


图 8-7 涡旋汽雾法工作现场

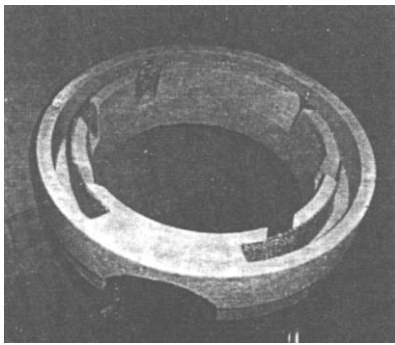


图 8-8 耐火材料制成的气旋环

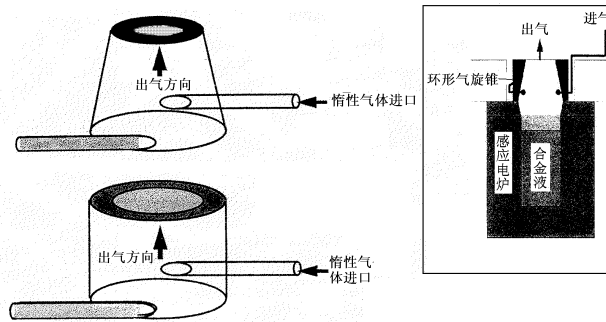


图 8-9 旋风覆盖法原理示意图(左)和安装位置(右)

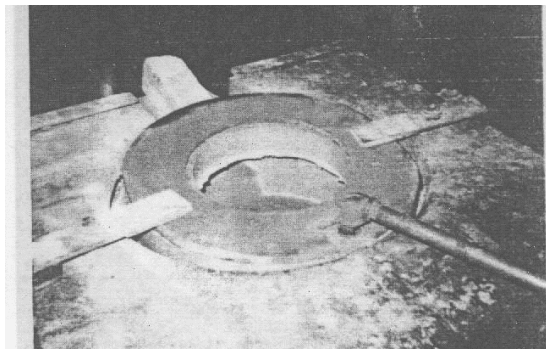


图 8-10 气旋环上加盖

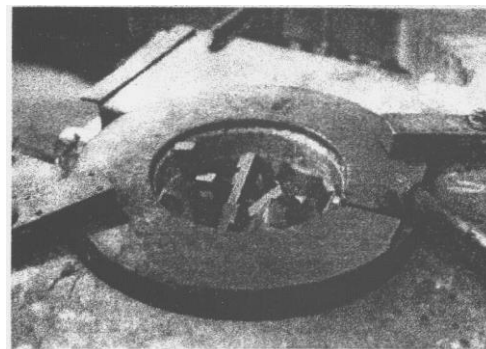


图 8-11 装入炉料后旋风覆盖法工作现场

要想用最小的惰气消耗量获得最佳保护效果，关键在于正确决定惰性气体的流量。确定惰性气体流量的主要依据是熔池表面积，也就是坩埚大小。增加惰气流量固然可以加强覆盖保护效果，但倘若气旋速度过快，反倒会将周围环境中的空气吸入而使氧气浓度增加。表 4-2 为不同坩埚尺寸时，适宜的惰气流量，熔炉上方始终都在抽风时选上限，时断时续抽风选下限。如果需要强力抽风，流量及出气口尺寸、数目还应适当增加，以弥补损耗。出钢时应停止供气，以免浇注时卷入气体，尤其当钢液从熔炉直接浇入型壳时更应注意这点。

尽管一般认为，从保证合金质量角考虑，熔池表面氧气浓度以控制在  $\leq 1.0\%$  (体积分

数)为佳,但为了进一步减少惰气消耗和避免操作者窒息,某些厂家认为采用较低的气体流量,使合金液表面氧气浓度保持在 10.0% (50% 空气被排除)即可。不同坩埚尺寸所采用的惰性气体流量罗列在表 8-1 和表 8-2 中<sup>[4]</sup>,供参考。

表 8-1 不同覆盖方法采用气体和气体流量  
(熔池表面氧气体积分数 $\leq 1.0\%$ )

覆盖方法	气体选择	气体流量 m <sup>3</sup> /h
旋风覆盖法	氩气	6.43~25.7
涡旋汽雾法	液氩或液氮	25.7~41.4
SPAL 法	液氩或液氮	42.9~68.6
LBI 法	氩气或氩/氮 混合气	62.9~137.1

表 8-2 不同坩埚尺寸采用的气体流量  
(熔池表面氧气体积分数 $\leq 1.0\%$ )

坩埚直径 /cm	涡旋汽雾法 气体流量 m <sup>3</sup> /h	旋风覆盖法 气体流量 m <sup>3</sup> /h
22.9	12.9~16.6	5.71~11.4
30.5	20.0~30.0	7.14~14.3
38.1	22.9~34.3	8.57~17.1
45.7	28.6~41.4	17.1~25.7
53.3	37.1~45.7	22.9~34.3
61.0	41.4~50.0	28.6~42.9
68.6	44.3~58.6	42.9~51.4
76.2	50.0~77.1	51.4~57.1
83.8	57.1~100.0	57.1~68.6

## 五. 应用实例

惰性气体保护熔炼自问世以来,深受许多精铸厂家青睐。大量试验和生产实践证明,使用该技术后,熔炼过程无需熔剂覆盖和脱氧,不但非金属夹杂、气体和夹渣等铸造缺陷大为减少,而且,由于合金液纯净度提高,流动性也有所改善,浇不足、冷隔等缺陷也随之减少<sup>[3]</sup>。废料甚至切削也可作为回炉料大量重熔使用。近来,美国 Conbraco 公司的试验证实,采用 SPAL 法后,100% 经多次重熔的回炉料,与全新料的力学性能竟然没有甚麽区别<sup>[3]</sup>。除此之外,由于不存在熔剂侵蚀问题,这就延长了炉衬或坩埚的寿命。值得一提的是,由于惰性气体的有效防护,使得原先在大气条件下很难熔炼的某些合金,例如 Cu-Be、Al-Li-Mg, 以及某些镍基和钴基合金等,都可以在大气下熔炼,有利于扩展熔模铸造的应用领域。

以下所列为部分应用 SPAL 和 LBI 取得成功的实例:

- Pine Tree Plant 是一个拥有 3 千万美元资产, 3 台 350kW 感应炉的较大型精铸厂,可铸造包括合金钢、不锈钢在内的大多数大气熔炼合金。试验合金包括常用合金(例如 410、440、303、347、17-4PH、D-2、8620、4140、Fe-0.13C 等)和特种合金(如 CN7M、F-75、CF-8M、CK-20、Fe-0.5Al 和 Ni、Co 基合金, 以及 Monel 等)。结果表明:疏松、夹渣、非金属夹杂物、浇不足等铸造缺陷明显减少,废品率下降 60%~80%。此外,还可降低浇注温度,延长坩埚和炉衬的使用寿命,钢中溶解氧气体量减少 90%,金属氧化损耗减少,合金化的效果增强,回炉料允许使用比例增加<sup>[5]</sup>。
- 美国某精铸厂采用此法铸造多种小型磁性合金(8%~12%Al 加 < 1.25% Ti 的铁基合金)精铸件。坩埚直径 30cm,容量 135kg。氩气流量仅 10 m<sup>3</sup>/h,就使熔池表面氧气体积分数下降到 0.6%~1.6%。感应炉上没有安装抽风管道而是通过除尘罩排除烟尘。实践证明,采用这种方法提高了合金液的流动性和充型能力,金属收得率提高 12%,每公斤炉料消耗惰性气体成本约 6.2 美分<sup>[4]</sup>。
- 美国某厂采用此法熔炼 Al-Li-Mg 合金,以减轻锂氧化和挥发,同时,减少氢溶解。熔炼设备为直径 58cm 的带盖电阻坩埚炉,气体流量为 2.1kg/min。当气体流量为 1.6kg/min 时,熔池表面氧气体积分数即下降至 0.1% 以下。合金液因氧化产生的浮渣几乎可以忽略不计, Li、Mg 等元素的利用率接近 100%,加入这些元素时产生的刺激性很强的浓烟接近完全消失,彻底避免了合金液燃烧的危险<sup>[4]</sup>。

- 某母合金生产厂熔炼 Fe、Cr 和 Ni 基高温合金母合金锭。氩气流量 0.45~0.68kg/min 时，直径 53cm 坩埚上方，氧气体积分数降低至 1%。当打开炉盖上的小口加料或取样时，炉内氧气浓度才缓慢上升至 7%~9%。最大的好处是减少了渣滓和提高了易氧化元素的利用率<sup>[4]</sup>。
- Franklin Bronze 和 Alloy Co., Inc 应用 SPAL 专利技术熔炼铸造镍-硼、镍-铝、镍-铜等非真空熔炼镍基合金和多种铜合金，取得了戏剧性效果。首先，熔炼过程中熔渣和渣滓减少了 85%，由于氧化和吸气减少，合金液流动性提高，镍基合金浇注温度降低约 38℃，晶粒尺寸减小了 27%，铁基合金浇注温度下降 19℃。允许回炉料的加入量由原先的 50% 增加到 100%。因此 SPAL 法已被列为该厂的标准工艺方法<sup>[6]</sup>。

自上世纪 90 年代以来，由于推广应用了过滤净化、惰性气体保护熔炼和小型炉预制锭快速重熔等新技术，使国外精铸件的冶金质量又提升到一个新水平，而国内普遍仍停留在原来水平徘徊。以致在国际竞争中，国产精铸件在冶金质量方面往往败北。其实，此项技术的原理和方法并不复杂，有关介绍和报道，在国内公开和内部发行的期刊杂志，以及专业技术会议上并不少见，但遗憾的是，响应者寥寥。又一次折射出，尽管自改革开放以来，我国精铸业取得了长足进步，但依靠科技进步和创新求发展的意识普遍淡薄。不少企业至今仍热衷于扩大规模，增加产量，对技术进步和创新则缺乏热情。须知，我国精铸业发展至今，如不尽快改变简单拷贝和克隆粗放经营、粗放生产的发展模式，就难逃在无休止价格战中互相倾轧的厄运。只有在技术上不断开拓创新，努力提高产品档次和质量，才能在竞争中赢得主动权，争取更加美好的明天。

#### 参 考 文 献

- 1 Kenneth Till. When Should You Use SPAL? What Should You To Expect? INCAST 1995(4):18~19
- 2 Kenneth Till, Terry Lasorda, Daniel Kotowitz. The Induction Melting Of Monel-A, For Large Heavy-Section Castings, While Under A Protective Shroud Of Liquid Argon. Investment Casting Institute: 42<sup>th</sup> Annual Technical Meeting, USA, 1994, No.7
- 3 F. Schlick, T.La Sorda. The Application Of SPAL To Increase The Use Of Revert Material In Ferrous Alloy Induction Furnace Charges. Investment casting Institute:50<sup>th</sup> Technical conferences, USA, 2002,No.23
- 4 Robert Best And Zbigniew Zurecki. Gas And Cryogen Swirling Methods For Inerting Molten Metal Surfaces. 9<sup>th</sup> world Conference On Investment Casting: USA, 1996, No.10
- 5 Douglas W. Fay, Robert Best. Development Of An Argon Swirl Inerting System In An Investment Steel Foundry. Investment Casting Institute: 45<sup>th</sup> Annual Technical Meeting, USA, 1997, No.18
- 6 Robert E. Barber, Terence La Sorda, Kenneth Till. Franklin Bronze Achieves Dramatic Results In SPAL Application Tests. INCAST 2002(5):16~17