

299120

成都工學院圖書館
高頻熱處理叢書
基本館藏

處理叢書

第 14 冊

小型无鉄芯感应炉熔炼

〔苏联〕A. A. 舍卡洛夫等 著



上海科学技术出版社

6125
223-2

22

高炉处理丛书

第 14 册

小型无铁芯感应炉熔炼

[苏联] A. A. 舍卡洛夫等著

朱新运译

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本丛书原版第一版于1954年出版,曾由本社翻译出版。1957年原书有了第二版,内容有相当大的修改,若干书名亦有更改,为此根据新版本重译重排,陆续出版。

本书为高频热处理丛书的第14册,内容主要介绍小型无铁芯感应炉的各种熔炼方法,其中如区域熔炼和无坩埚熔炼两章,则是第一版没有提到的,有不少材料在应用上都很有参考价值。

高频热处理丛书

第 14 册

小型无铁芯感应炉熔炼

ПЛАВКА В МАЛЫХ БЕССЕРДЕЧНИКОВЫХ
ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ

原著者 [苏联] А. А. Шекалов, Я. И. Штрейс,
В. В. Блинов

原出版者 Машгиз • 1957年第2版

译者 朱 新 运

*

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出093号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店经售

上海洪兴印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 1 30/32 字数 41,000

1963年2月第1版 1963年2月第1次印刷

印数 1—2,000

统一书号: 15119·1712

定 价: (十二) 0.24 元

序 言

在无鉄芯高频感应炉中熔炼合金，业已得到了广泛的应用。在苏联，首先设计和建立这种感应熔炼炉的是 B. II. 沃洛格金教授实验室，它和“电工”厂一起，曾经设计出 10~3000 公斤容量不等的各种类型的炉子，并由“国家工业企业电气设计院”(Электروпром)推行到各工业企业单位使用。

在感应炉中熔制各种合金，可以实现最完善的工艺过程。此外，感应炉熔炼还开辟了炼制过去一切加热方法达不到的、高纯度和成分高均匀的金属和合金的可能性。目前，苏联的工业部门已经生产了许多型式的感应炉，其熔炼金属的容量可小自数克大至若干吨。

目 录

序 言	
緒 論	1
第一章 感应熔炼炉的装置	2
第二章 炉衬	9
1. 用干料捣制坩埚	11
2. 用湿料捣制坩埚	20
3. 用成型耐火材料制造坩埚	21
4. 小型实验室用感应炉的坩埚	21
第三章 熔炼	25
第四章 真空熔炼	33
第五章 氩-真空熔炼	47
第六章 区域熔炼	50
第七章 无坩埚熔炼	53
結束語	57

緒 論

无鉄芯感应炉在冶金方面的应用，促进了制造各种优质金属和合金技术的进步。感应炉熔炼法除了保持坩埚熔炼和电弧熔炼的优点之外，还有它本身的特点和优越性。

首先，高频感应炉的特点是熔炼的速度快。这就創造了在燒損最少的情況下煉制一定成分的合金的有利条件；并且提供了提高生产率的可能性。

感应炉用的是不含碳质的坩埚，因而合金有可能免受增碳的影响。这是感应炉比电弧炉具有的一个极为重要的优点。

在感应炉的熔炼过程中，熔融的金属受到力的作用，这种力是由通过感应器的电流和熔融金属中的感应电流的相互作用而引起的。作用力的方向沿着徑向指向熔融金属的中心，結果，金属便沿着坩埚的中心軸綫自上往下运动，起了有益的循环作用，激烈地攪动金属熔体，于是保证了合金的成分很快地趋于均匀。

感应炉熔炼的重要特点是：熔炼时的热量直接发生于金属炉料之内，而并非由外界加热傳入的。这样，就为将金属加热到很高的温度創造了可能性，因为限制着提高熔炼温度的，实际上仅是熔炼坩埚的坚固性和防止热量向周围介质輻射損失的可能程度。

感应加热由于上述的特点，因此熔炼不仅可以在空气气氛下进行，而且也可在真空中和保护气氛中順利进行，例如在不同压力的氩气或惰性气体中熔炼。这时，压力可以降低很

低,气体介质可以保持高度純洁。

最后,采用感应炉熔炼可以大大地改善熔炼工人的劳动条件,提高生产的技艺。

无鉄芯感应炉熔炼的主要缺点是炉渣的温度低。这是由于炉渣的导电性低,受电磁場直接加热的作用小。炉渣的加热,主要是依靠由金属熔体傳导过来的热量。于是,炉渣的反应能力也弱了。因此,必須采取措施为金属与炉渣間的反应創造有利条件,以期无鉄芯感应炉內的脫碳、脫磷和脫硫以及非金属夹杂物的排除过程得以迅速进行。

对于高熔点金属的熔炼,感应加热和感应炉熔炼的作用更为明显。例如熔炼鉍族金属、高合金鋼与高合金鑄鉄、永磁特殊合金、軟磁材料、耐热合金和特殊热膨胀合金和特殊彈性合金等等。

瑞典是应用感应炉熔炼的主要国家之一,它用感应炉炼制的鋼占全国的鋼产量 5.2% (1951 年) 和 7% (1952 年)。

随着发电量的增长,感应炉将得到更为广泛的应用。但是,只有正确地执行熔炼的工艺規程和遵守炉子的操作規則,才能有效地应用它。

第一章 感应熔炼炉的装置

无鉄芯感应炉是一个内部装有坩堝的多匝感应器,坩堝即供熔炼金属之用。当交变电流通过感应器时,感应器周圍产生磁場,使装入的金属炉料感应出电动势,在金属块內引起感应电流,依靠感应电流的作用,加热所有装入炉內的金属材料。感应电动势的大小与电流通过感应器綫匝所产生的磁通

量和电流频率有关。

无铁芯感应炉的效率，决定于熔融金属的电阻和电源电流的频率。为了保证得到高的效率，炉子的装料直径（即等于坩埚内径）不应小于电流透入金属的深度的4~7倍^①，感应器的直径越小，通过感应器的电流频率应该越高。由此可见炉子的容量与电源电流的频率有关。表1所列是熔炼钢、铁时，炉子容量与电流频率、发电机功率及型式的大概数据。

表1 电流频率与炉子容量的关系

炉子容量 (公斤)	电流频率 (赫)	发电功率 (瓩)	发电机类型	熔炼时间 (分)	电能消耗 (瓩·小时/公斤)
10	300,000~ 100,000	30~60	电子管型 ^①	20~15	1.5~2.0
50	200,000~ 10,000	60~100	电子管型、 发电机型	40~30	0.8~1.0
250	3,000~ 2,000	150~250	发电机型 ^②	70~50	0.7~0.8
500	2,000~ 1,000	250~500	发电机型	70~50	0.6~0.8
1,000	1,000~500	500~600	发电机型	80~60	0.6~0.7
10,000	500~150	2,500~ 3,000	发电机型、离 子变流器 和倍频器	90~100	

① 见本丛书第9册，A. C. 华西尔耶夫著：《金属与电介质加热用电子管振荡器》。

② 见本丛书第8册，P. II. 热日林，M. A. 斯比岑著：《高频加热用发电机》。

图1所示是无铁芯感应炉和机器发电机所组成的熔炼装置的一般外形。

无铁芯感应熔炼炉的结构(图2)由下列几部分组成：

(1) 带有折转机构的金属架；

① 见本丛书第2册，H. II. 格替哈诺夫著《高频加热的物理基础》。

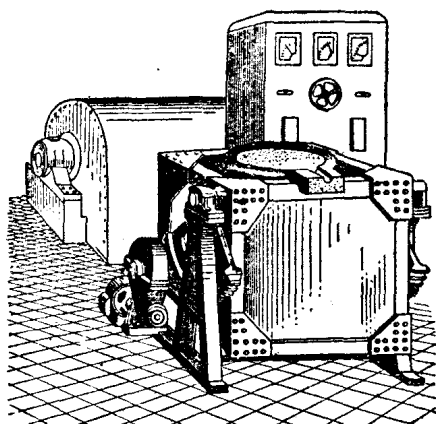
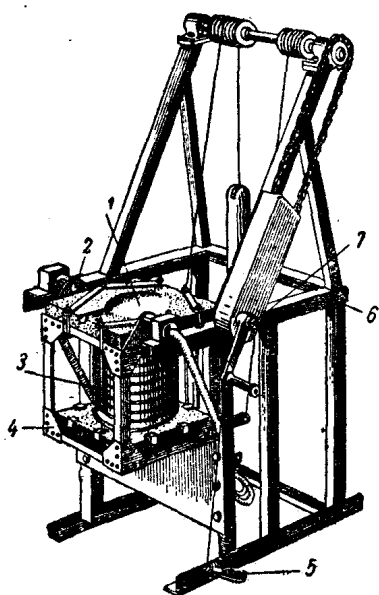


图1 由高频发电机供电的无铁芯感应炉熔炼装置的一般外形
(炉子容量为 1000 公斤钢)



- 1—搞制的坩埚；
- 2—折转轴；
- 3—感应器；
- 4—折转托架；
- 5—放炉踏板；
- 6—炉身支架；
- 7—折转机构

图2 带有坩埚的无铁芯感应熔炼炉
(苏联高频电流科学研究所设计)

(2) 折轉托架；

(3) 帶有耐火爐襯的感應器。

小型感應爐(容量小於 50 公斤)的爐身支架用角鋼製成。爐身折轉托架的轉動用手工操作。操作時必須保證能夠觀察到金屬的澆注過程，折轉托架做成可以停留在任何一個位置上。

大容量感應爐的爐身支架通常是鑄造的。折轉機構則由電力拖動。

無論小型或大型感應爐，爐身的折轉托架，一般都是用非磁性材料製造，例如用無磁鋼、黃銅或鋁硅合金，其目的在於減少因感應器外磁場產生感應電流引起的發熱。如果托架採用磁性材料製作，其尺寸勢必增大，整個爐子結構的尺寸也將隨之加大。但是，也還有大容量感應爐的托架採用磁性材料製造的，這時為了減少托架的發熱，採取屏蔽的辦法，使爐殼與外部鋼結構件免受感應器外磁場的影響，即在爐體內裝一

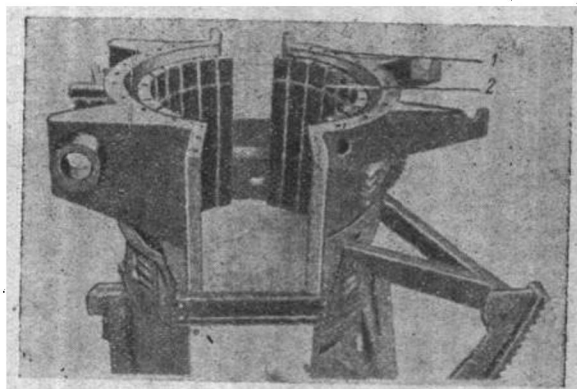


圖 3 裝有導磁體的感應爐爐體
(已取去坩堝及感應器)

1—爐子外殼；2—硅鋼片迭成的導磁體

层用硅鋼片迭成的导磁体(图3),或采用高电导率的材料来制作炉壳。炉子由于装入导磁体引起的屏蔽损失一般是不大的,不超过炉子功率的1%。

为了避免感应器外圈的构件形成闭合回路,炉身折轉托架的骨架应分成几个单独的部分,它們既要在机构上牢固連結,又要在电气上彼此絕緣(图4)。同样,炉架上的一切紧固零件都要用非磁性材料制造。

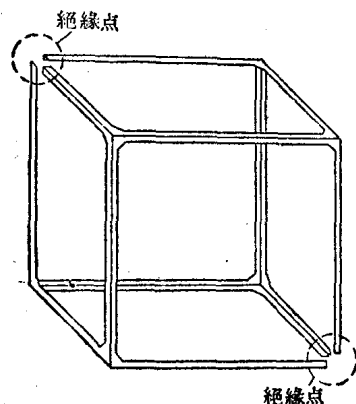


图4 折轉托架的絕緣示意图

小型感应炉的折轉托架的上下表面都鋪有坚固的陶瓷板(通常是粘土板)。陶瓷板的結構形式應該保証感应器坚固可靠,便于迅速取出损坏了的坩堝和熔炼的进行。为此,在上部陶瓷板上开一个直径等于感应器內徑的圓孔,和一道为設置炉子(坩堝)澆咀用的不大的凹槽。下部陶瓷板上也开一个圓孔,以便取出损坏的坩堝。此外,在上下部陶瓷板上还开有槽;以便安装固定感应器支柱的垫圈。

感应器是一个由成型銅管繞成的多匝螺旋綫管。为了保証感应器綫匝的必要的剛性和綫匝間的距离不变,用角型銅將多个綫匝紧固在对称排列于感应器周圍的层压胶板支柱上;角型銅用黃銅焊料与感应器焊接在一起;然后用黃銅或紫銅螺栓把它紧固在层压胶板支柱上。这样的固定能防止炉子运行时感应器綫匝的位移和短路。此外,为了不使凝聚在綫匝上的水流到层压胶板支柱上引起相邻綫匝的电击穿,一般

要使焊接在綫匝上的角型銅具有約 30° 角度。再其次，所有緊固感應器與支柱的金屬零件，彼此間應有可靠的热接觸。

為了增加結構的強度，感應器的支柱固定在石棉水泥做的墊圈之間，墊圈則放置在陶瓷板的槽中，並用角型銅和黃銅螺栓把墊圈和層壓膠板支柱固定。為了保證墊圈的冷卻，感應器的兩端綫匝相應的要加以彎曲。這樣一來，會使感應器兩端綫匝形成楔形的縫隙，使搗制坩堝時很難均勻地搗實填料，降低坩堝的強度。因此須用硬焊料把足夠厚的銅板楔子焊在感應器的兩端綫匝上，以填補縫隙，使綫匝之間保持規定的距離。

由於石棉水泥墊圈的強度低，使用壽命不長，因此用銅板墊圈來代替。這時，墊圈直接焊接（或釔焊）在感應器兩端的綫匝上。為了防止形成短路環匝，墊圈製成開口形。墊圈外緣開幾條徑向槽，有利於減少墊圈內的電能損耗。具有徑向槽的銅墊圈和銅楔子的感應器如圖 5 所示。

如上所述，感應器採用銅管製造，這是為了保證它的冷卻。當感應器綫匝有效截面的電流密度為 100 安培/毫米² 時^①（首先是單位功率較大和功率因數低的爐子），就必須用水進行強制冷卻。此外，由於

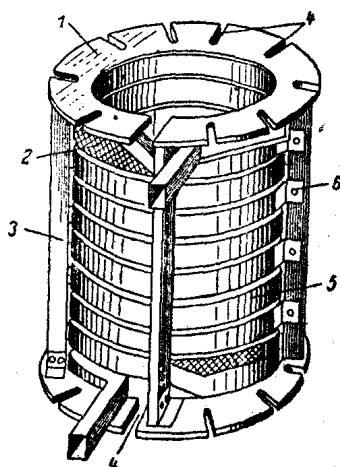


圖 5 具有銅墊圈與銅楔子的感應器

1—銅墊圈；2—銅楔子；3—層壓膠板支柱；4—墊圈的開口處；5—感應器的綫匝；6—角型銅

① 見本叢書第 2 冊，H. II. 格魯哈諾夫著：《高頻加熱的物理基礎》。

熔融金属透过坩埚的壁傳导出大量的热，因此用水强制冷却也属必要。

感应器的供水通常是通过翻倒炉身的折轉托架的空心軸来进行的。供水應該連續不断，因为稍有停頓，就会引起留在綫匝管内的水剧烈蒸发，使感应器綫匝熔化。为了避免这种事故，在熔炼設備中設有一种装置，当水压降低时即自动截断感应器的电源。

大容量感应炉由发电机供給音频电流，感应器上的电压为 300~2000 伏。

小容量感应炉由电子管振荡器供給射频电流，感应器端子上的电压最好不超过 3000~4000 伏。因为电压再高，就很难保証可靠的电气絕緣，也难于防止感应器各綫匝之間的放电（通常感应器綫匝間間距为 3~5 毫米）。尤其是当感应器綫匝貼靠在石棉圓筒上时，由于石棉是不良的絕緣体，放电总是沿着石棉表面发生，而与感应器綫匝間空隙大小的关系不大。如果感应器上的电压較低，为要輸入必需的功率，就要增大饋电母綫以及和电容器相連母綫中的电流（电容器是感应炉电路中必要的元件^①）。

将大的电流輸入感应器会使导綫的制造复杂化，但是，并不影响炉子的傾倒过程。能满足这个条件的最好的饋电的结构，應該是通过接触閘刀与接触片从母綫輸入电流；但是也应该注意到，这样的系統只有在用水冷却接触閘刀与接触片的条件下才能进行可靠的工作。有許多炉子是通过装有精加工的銀质压力接触器来輸入电流的，这时接触器能完滿可靠地工作，而无需用水冷却。

感应炉的折轉机构应能迅速地倒出熔化的金属，这对小

^① 見本丛书第 10 册，A. H. 沙莫夫著：《高频加热装置发电机供电》。

容量感应炉特别重要,因为它的热惯性小。炉身的折轉軸要装置成这样:当改变托架的角度折轉炉子时,不会改变熔化金属流的流出方向。炉子的这种装置,使熔化金属可能直接澆入鑄型或鋼錠模內,不必再經過澆桶。这对于熔炼少量金属有很大意义,特别是实验室用炉子。

第二章 炉 衬

上面已經說过,感应加热是在感应器內的坩堝里进行的。在无鉄芯感应炉內熔炼金属和合金,由于坩堝工作条件的特点,对制造材料提出了一系列的特殊要求,这些要求的满足程度,关系着坩堝的强度,亦即关系着坩堝的使用寿命。

在設計感应器时,为了提高电效率,感应器綫匝和金属炉料之間的間距要尽可能小些,这就限制了坩堝壁的厚度,并由此影响了坩堝的强度。

容量 10~20 公斤的炉子,坩堝壁厚一般不超过 20~25 毫米;容量 100~200 公斤的炉子,坩堝壁厚增加一倍;容量 1000~3000 公斤的炉子,坩堝壁厚可达 100 毫米,而容量 12000 公斤的炉子,坩堝壁厚为 150 毫米。坩堝壁厚的这种对应关系,当其装满液体金属时,要承受相当大的負荷,因此制造坩堝的耐火材料,不論在冷态或受热状态下,都应具有高的机械强度。

在感应炉內熔炼,坩堝的加热是依靠内部炉料来进行的。金属熔化后,坩堝內表面的温度达到 $1500\sim 1700^{\circ}\text{C}$,这时,坩堝外层的温度却接近于通水冷却的感应器綫匝的温度。因此沿着坩堝壁的厚度(坩堝壁的厚度視炉子的容量决定,自

20~150 毫米), 出現約 1500°C 的溫度差。由於冷的坩堝外壁不讓受熱的內壁作自由膨脹, 使坩堝材料內產生很大的機械應力, 有可能導致坩堝的毀壞。為了防止坩堝的碎裂, 用高導熱率的耐火材料來製造坩堝是不合理的, 因為這要增加熱損失, 降低爐子的熱效率。因此, 必須採用體積膨脹係數最小的和導熱率低的耐火材料來製造坩堝。

此外, 坩堝的材料應能經受 $1500\sim 1700^{\circ}\text{C}$ 的高溫; 應有足够的抵抗爐渣作用的化學穩定性, 而且在受熱狀態下不應有大的電導率, 以免感應電流直接在坩堝材料內產生熱量。

但是, 不是所有的耐火材料都能滿足上述這些要求。根據感應爐工業熔煉時製造坩堝的實踐證明, 最好的材料是石英石(用作酸性爐襯)和鎂砂(用作鹼性爐襯)。至於中性材料如剛玉(國外文獻上稱剛鋁石), 氧化鋁, 氧化鎢和氧化鈦, 由於價格昂貴而很少採用。

石英抵抗酸性爐渣的性能很好。呈鱗石英狀態的石英, 具有最好的耐火性能和急冷急熱性能。溫度改變時, 鱗石英雖發生形態的轉變, 但不会引起大的體積改變, 且不產生大的內應力。

鎂砂具有高的耐火性能, 並有良好的抵抗鹼性介質和鹼性爐渣的性能。鎂砂的質量經過幾次焙燒以後會變得更好, 因為這時生成不再發生物理轉變的方鎂石晶粒。焙燒時, α -鎂砂(密度 3.2 克/厘米^3)轉變為 β -鎂砂(即方鎂石, 密度 3.7 克/厘米^3), 同時原料大量收縮。鎂砂的焙燒應在與熔煉相同的溫度下進行, 這樣才能得到最理想的晶體結構。但是, 即便是死燒的鎂砂, 除了有方鎂石外, 總還含有一些 α -鎂砂, 後者在坩堝運行過程中, 還會繼續轉變成為方鎂石, 同時發生很大的收縮, 這就是爐襯出現裂紋的原因。電熔的鎂砂具有最好的

性能,它的收縮極小,導熱率比死燒過的鎂砂低 25~30%,缺點是溫度膨脹系數大,降低了熱穩定性。在實際上,常用焙燒鎂砂與電熔鎂砂的混合物來製造坩堝。

比較石英和鎂砂的性質,知道石英的熱穩定性比鎂砂大 1.5 倍,石英的膨脹系數、導熱率和電導率都比鎂砂低。石英的這些優點,加上原料价格便宜、急冷急熱性能好以及製造方法簡單等優點,使酸性坩堝比鹼性坩堝應用得更为普遍,所以容量超過 1.5 噸的爐子,一般都不採用鹼性爐襯坩堝。鹼性坩堝主要用于真空熔煉。

爐襯材料中最重要的膠合劑和粘結劑是硼酸和玻璃粉(數量上達 2~3%),起着膠粘耐火材料顆粒的作用,在某些場合下,也採用水玻璃和耐火粘土(高嶺土)。

在選用適當的耐火材料之外,製造坩堝的方法也有很大的意義。一般製造坩堝方法有:

(1) 用乾燥的材料搗制坩堝,並以熔化金屬模型或加熱石墨杆來燒結爐襯。在個別場合,這個方法是應用預先製造的粘土的、鎂砂的或石墨的襯套作為模型來製造坩堝;

(2) 用濕潤的材料搗制坩堝;

(3) 用成型耐火磚製造爐襯。

所有上述的方法都有其優點和缺點,合理選用這個或那個方法,仍須取決於爐子的容量和用途。

根據感應爐的統計資料和爐子運行的經驗,製造無鐵芯感應爐爐襯的最完善和最通用的方法,就是用乾燥的材料來搗制坩堝,並以熔化鐵模型來燒結爐襯。

1. 用干料搗制坩堝

坩堝材料的配制 在配制酸性爐襯用的乾燥的坩堝材料

时,采用純石英石。容量不大的炉子,可以用清洗磁选过的石英砂来代替純石英石。但是用石英砂制造的坩埚,其强度通常都較石英石的差。除了原材料质量对坩埚的寿命有影响外,耐火材料的顆粒大小也有影响。

应用小顆粒的材料作坩埚配料时,由于增加了接触表面,可在减少粘結剂用量的情况下保証炉衬有滿意的燒結。这样,就可以得到較密致的、能抵抗金属与炉渣的炉衬。但是,如果炉衬混合料中細粒材料的含量过高,却会降低坩埚炉衬的热稳定性。

在混合料中增加粗粒度砂子的用量,能改善炉子的隔热性能,它可以保护感应器防止燒結层形成裂紋时金属从炉內流出,而且对于温度剧烈改变时产生的应力和对炉衬的机械力起着緩冲作用。但是,如果混合料中仅仅只有粗粒度砂子,却难于在与液体金属接触的坩埚內表面造成稳固完整的燒結层。因此,最合理的配料是同时采用各种大小的顆粒。能滿足上述要求的酸性坩埚顆粒的一般組成如下:

顆粒的大小(毫米)	重 量 (%)
3~2	65
2~1	15
1~0.5	10
0.5 以下	10

在实际工作中,为了坩埚具有足够的耐久性,配料顆粒的組成与上表所列有些出入,自然也是可以的。

配制好的干燥材料,可加入1.5~2%(按容积)的工业硼酸作为粘結材料。当搗制坩埚的上部时,在干燥材料內加入25~30% 細磨过的耐火土,并加入5~6%(按重量)的水使之潤湿。有时,坩埚的上部材料采用石英砂与5%水玻璃混合料