

# 真空感应悬浮熔炼技术在高纯材料制备中的应用

严建强<sup>1</sup>, 白志宇<sup>2</sup>, 张志勇<sup>1</sup>, 史昆<sup>1, 3</sup>, 何永亮<sup>1, 3</sup>, 于雷<sup>4</sup>, 范顺昌<sup>4</sup>

(1. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022; 2. 北京航天动力研究所, 北京 100076; 3. 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022; 4. 空装驻辽阳地区军事代表室, 辽宁沈阳 110000)

**摘要:** 叙述了真空感应悬浮熔炼技术在制备高温、高纯等合金材料方面的优点, 介绍了真空感应悬浮炉的关键技术以及装备的最新发展与应用, 讨论了该技术在熔炼高质量特种钢等新材料方面的应用, 并分析了该技术在熔炼其他材料等领域的应用及可行性。

**关键词:** 感应电源; 真空悬浮熔炼炉; 特种钢; 高熵合金

在科技日新月异的今天, 很多高温、高纯的合金材料具有很高的实际意义与战略意义。而能够将各种不同的原材料通过熔炼工艺形成我们需要化学成分的合金(铸件或合金锭), 主要取决于熔炼装备及熔炼工艺, 为了保证合金材料具有优异的性能, 必须严格控制化学成分和纯净度。合金材料熔炼通常要选择适合的熔炼装备及熔炼工艺, 为了解决在制备高纯净、高熔点和高活性合金材料时容易出现的坩埚材料对所熔合金材料污染和组分不均等问题, 真空感应悬浮熔炼装备及工艺应运而生。该工艺是一种优异的高纯活性金属熔炼方法, 能够完美的解决高性能铸造合金材料在熔炼过程中的污染以及组分不均等问题, 并且强烈的电磁搅拌还可以促进高低熔点元素的均匀化, 成分均匀性更高, 在高温下可有效去除熔体内易挥发杂质, 非常适合熔炼一些高纯活泼金属或合金、难熔金属、靶材以及高纯多晶硅等材料。该工艺是目前国际上最先进的材料制备技术之一, 是专门为材料科学的科研而设计的, 该设备在美国、俄罗斯、德国、日本、法国等国家经历了几十年的发展历程, 在俄罗斯, 真空感应悬浮熔炼技术存在已超过70年<sup>[1]</sup>。随着我国装备制造业的高速发展, 真空感应悬浮熔炼装备在我国航空航天事业、钛铝合金生产、高纯材料制备、金属氧化物制备、特种合金材料制备等领域的应用也得到了快速发展。

## 1 悬浮熔炼关键装备及应用研究

感应悬浮熔炼工艺由于其依靠电磁力使被熔材料与坩埚壁保持动态接触或不接触状态, 能够熔炼高温、高纯、难熔合金, 因此, 该工艺是目前应用比较广泛的一种熔炼高质量合金的熔炼技术。近些年随着高质量合金应用越来越广泛, 使用感应悬浮熔炼技术的厂家越来越多, 所熔炼的合金材料也越来越广泛, 包括: 钛铝合金、铝钎合金、钛基复合材料、高熵合金、镍基高温合金、铌硅合金、含钨合金、非晶合金等多种材料。真空感应悬浮熔炼装备主要由真空系统、水冷系统、感应熔炼系统以及控制系统等组成。其中, 中频感应电源及冷坩埚是真空悬浮熔炼炉中关键设备, 随着水冷坩埚容量的不断提升, 该设备正在向能够满足生产需求的大容量方向发展。

### 1.1 大型水冷铜坩埚的研究

在熔炼高质量合金时坩埚的选择非常重要, 普通真空熔化炉坩埚的耐火材料

作者简介:

严建强(1981-), 男, 硕士, 主要研究方向为铸造设备研究及铸造特种不锈钢材料研究。E-mail: 378415767@qq.com

中图分类号: TG232

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)02-0253-04

收稿日期:

2023-05-29 收到初稿,  
2023-12-15 收到修订稿。

会污染合金熔体，引入外来夹杂物，严重危害材料的力学性能，因此，在制备高纯合金时坩埚的选择至关重要，如图1<sup>[2]</sup>。美国BMI研究所的G.H.Schippereit等人1961年发现，电磁场可进入有缝的铜坩埚，对坩埚中的材料进行加热。采用感应加热方式配合有切缝的水冷铜坩埚对坩埚中的合金材料进行加热，不仅解决了传统耐火材料的污染问题，强烈的电磁搅拌还解决了成分偏析造成材料组织和性能分布不均问题。合金全部放于水冷铜坩埚中，这就要求磁场尽可能多的穿越铜坩埚作用于合金上，同时铜坩埚消耗能量越少越好。当容量一定的情况下，坩埚的体积一定，坩埚分

瓣的数量根据有效截面积计算，这样可以有效保证磁力线尽可能地穿过坩埚而作用在被加热物料上，同时也可以减少坩埚本身所产生的涡流，降低能量损耗。同时为保证铜坩埚在交变的磁场中稳定的工作，必须保证充足的水冷，冷却形式主要根据坩埚容量以及感应熔炼的方式所决定，如图2。

水冷铜坩埚设计主要注意的关键点：

(1) 首先根据坩埚的容量设计坩埚的形式、瓣数，设计每瓣的形式，减少坩埚横截面积降低功率损耗；设计需考虑加工制造问题以及后期使用安全问题。

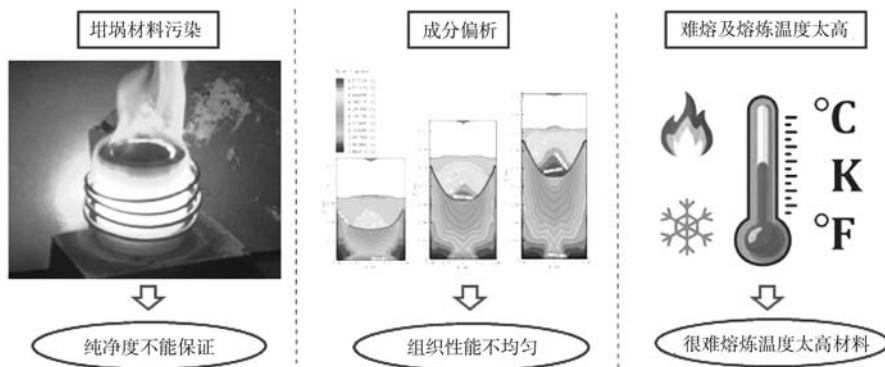


图1 金属及合金材料在熔炼过程遇到的主要问题

Fig. 1 Main problems encountered in the smelting process of metal and alloy materials

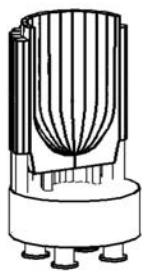


图2 水冷铜坩埚图片

Fig. 2 Picture of water-cooled copper crucible

(2) 选择合适的冷却方式，根据坩埚容量、感应电源功率计算坩埚消耗的无用功，根据无用功以及冷却水压力、进回水温度、比热容等计算冷却水流量，选择适合的冷却水管径。

(3) 坩埚组装过程中需要考虑高温焊接坩埚瓣变形问题以及装配时的绝缘密封和缝隙宽度问题。

## 1.2 感应悬浮熔炼技术感应电源的研究

感应加热的理论基础在于交流电磁场与被加热物体的相互作用，而不存在电接触，这就大大提高了感

应加热的应用范围，而感应悬浮熔炼要求具有高功率以及高频率的特点，感应加热电源部分采用IGBT形式，IGBT是一种快速开关模块，频率具有较宽的调整范围，针对熔炼过程中负载变化，自动匹配补偿的电容量，实现自激振荡，功率因素达到95%以上。同时，在电源和冷坩埚感应加热装置之间的水冷铜排及同轴导电部分，通常采用对称布置，减少线路功率损耗。在设计悬浮熔炼炉感应电源时，首先需要根据坩埚容量的不同以及所熔物料的不同，正确的选择适合的功率以及熔炼频率，如公式(1)。

$$f=1/(2\pi\sqrt{LC}) \quad (1)$$

式中： $f$ 为电源频率，Hz； $L$ 为电感，H； $C$ 为电容，F。

当熔炼合金容量一定的情况下，坩埚的有效体积是一定的，通过选择适合的负载以及感应线圈，确定铜管的截面积、感应线圈的匝数，可以确定谐振电路的电感量，根据设备具体情况加以人工修正。电感量确定为常数，通过调整负载电容调节设备的频率，最终达到熔炼的谐振频率正好在设备可以调节的频率范围内。这样就可以保证在满足悬浮效果的基础上，尽量降低熔炼的功率，降低无功损耗，能够保证功率的

高效利用。

## 2 感应悬浮熔炼钛铝合金等尖端合金材料熔炼工艺

借助悬浮熔炼技术成功制备了N、H、O达到ELI级别的钛合金，达到了高净化熔炼的目的。非晶所含元素多，元素间物性差异大，采用传统熔炼技术难以做到均匀化，借助悬浮熔炼内热式熔化和电磁搅拌技术成功开发了多种Zr基和Ti基非晶合金，突破了大尺寸非晶母合金的制备难题。钛铝合金是一种室温塑性较差的材料，铝含量（质量分数）达到30%以上，熔炼过程中易烧损和挥发，合金成分精确控制难度极大，同时该合金凝固收缩率大，且对间隙元素含量极为敏感，合金制备及铸件浇注过程中易产生密集型缺陷、开裂等问题。借助悬浮熔炼的惰气保护机制和过热度可控的功能，成功制备了大尺寸TiAl合金铸锭并浇注出典型铸件，解决了铸造钛铝合金存在铸锭成分偏析和组织不均匀等问题。液态钛加入金属Al形成金属间化合物，化学成分稳定，工艺性能良好。表1可以清晰地显示经过真空悬浮熔炼后的TC4分别从上、中、下三个部位取样检测，成分非常均匀，并且N、H、O达到ELI级别，达到了高净化熔炼的要求。

表1 TC4ELI合金化学成分  
Table 1 Chemical composition of TC4ELI alloy  $w_B/\%$

项目	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O
上部	6.37	4.05	0.11	0.02	0.03	0.011	0.003	0.10
中部	6.24	4.12	0.14	0.02	0.03	0.013	0.003	0.10
下部	6.2	4.00	0.1	0.02	0.04	0.012	0.003	0.10

难熔合金熔点高于2 000 °C的合金，当熔炼温度高于2 000 °C时，对坩埚水冷提出较高的要求。由于悬浮熔炼过程中，合金熔体可悬浮/半悬浮于坩埚内，高温熔体对坩埚损害作用小，反之，提升了悬浮熔炼熔炼难熔合金的能力。通过真空感应悬浮熔炼制备了NbTi、NbSi等高熔点合金，为难熔合金的开发开辟了一条全新的道路，如图3。

真空感应悬浮熔炼炉还在高纯合金的熔炼方面同样具有很多优势，例如熔炼高熵合金、非晶合金、稀土、特种钢等高纯合金材料。真空感应悬浮熔炼是一

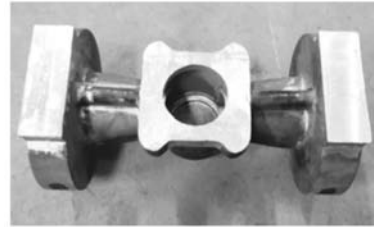


图3 难熔合金阀体铸件

Fig. 3 Refractory alloy valve body casting

种非常先进的熔炼工艺，简单方便、熔炼量较多、熔炼合金无污染，并且还能够保证高熵合金等高纯合金材料成分的准确性、均匀性。稀土合金是我国非常重要的战略资源，一般在稀土熔炼时主要使用钨、钼、钽板坯卷焊而成的坩埚或整体烧结态钨坩埚，随着冷坩埚熔炼技术的不断发展，目前熔炼高纯稀土合金可以采用感应悬浮熔炼代替价格昂贵的贵金属坩埚，并且水冷铜坩埚可以反复使用上千次，大幅降低了合金的熔炼成本。

特种钢也叫合金钢，在碳素钢里适量地加入一种或几种合金元素，使钢的组织结构发生变化，从而使钢具有各种不同的特殊性能。夹杂物是特种钢中的有害物质，通常以金属氧化物的形式存在，夹杂物通常会割裂基体，从而引发应力集中，造成特种钢工件的断裂失效。通过感应悬浮熔炼对特种钢的重熔净化的研究表明，大量尺寸较大的夹杂物可在电磁场的作用下溢出金属液表面，起到较好的提纯除杂作用。

## 3 结论

真空感应悬浮熔炼是近几年发展较快的高质量合金熔炼技术，代替了传统的坩埚材料，不仅可以熔炼高温、高纯、难熔合金，并且坩埚可以反复使用上千次，解决了我国尖端合金材料研发方面的不足，同时降低了研发成本。未来纯净高质量合金的熔铸是铸造工业技术的发展方向，是提高铸造产品性能、质量，减少产品缺陷以及后续处理的有效工艺手段，同时也符合低碳经济、绿色铸造以及可持续发展的要求。未来铸造行业的发展趋势是向大型化、轻量化、精确化、智能化、数字化、网络化及清洁化的方向发展，而能够解决清洁高端铸件铸一体的真空感应悬浮熔炼设备将成为未来应用和发展的方向。