

真空感应熔炼技术的发展及趋势

李日蛟

(爱发科真空技术(沈阳)有限公司 辽宁 沈阳 110171)

【摘要】真空感应熔炼技术是一种高效、环保、可控性强的金属材料制备技术，已被广泛应用于各个领域。本文从感应熔炼原理，发展历程及现状分析和发展趋势及展望三个方面综述了真空感应熔炼技术的特点和影响，重点介绍了该技术现阶段的制约因素和发展方向，并展望了未来真空感应熔炼技术的发展趋势。

【关键词】真空感应熔炼技术；帕邢曲线；合金材料；应用前景；发展趋势

引言

真空感应熔炼技术是一种先进的材料制备技术，具有高纯度、高质量、高效率等特点，广泛应用于合金材料、稀土磁性材料、超导材料等领域。本文旨在探讨真空感应熔炼技术的熔炼原理，发展历程及现状分析以及未来的发展趋势。

一、真空感应熔炼技术原理

真空感应熔炼技术是在真空条件下，利用中频感应加热原理，将金属熔化的成套真空冶炼设备。在熔化过程中，因为感应熔炼技术的特点，液态的金属炉料在坩埚内部由于受到电磁力的相互作用，可以自动实现搅拌，使成分更加均匀，这也是感应熔炼技术的一大优势。由于整个过程发生在真空环境下，因此，有利于金属内部气体杂质的祛除，得到的金属合金材料更加纯粹。同时冶炼过程中，通过真空环境以及感应加热的控制，可以调整熔炼温度并及时补充合金金属。



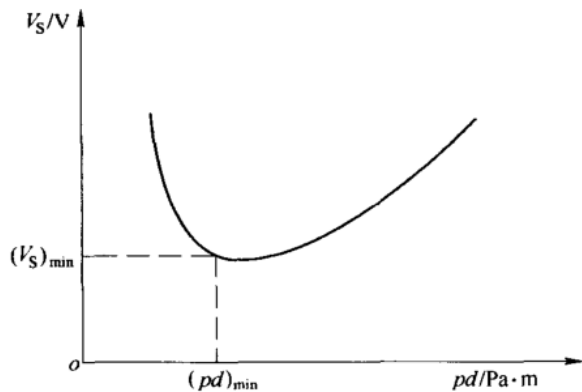
图 1 真空感应炉



图 2 感应线圈

如图 1 所示真空熔炼设备炉体内部设有一个螺旋型管式线圈，当线圈通以中频电流时则产生交变磁场，金属炉料在磁场的作用下感应出感生电流，电流在本身的磁场作用下集中在金属炉料的外层（肌肤效应），使外层的金属炉料具有很高的电流

密度从而产生强大的电阻热，进而融化金属；将这种螺旋型管式线圈放置在真空炉内就是一个简单的真空加热设备；但是新的问题也会产生那就是真空放电；真空放电（电击穿）现象是制约所有真空感应熔炼技术的难点，击穿电压 V_s 主要受气体压力 p 和极间距 d 的影响。但是， V_s 并不是分别随 p 和 d 来变化，而是二者乘积 pd 的函数。即 $V_s = f(pd)$ 。1889 年，帕邢 (Paschen) 首先在实验室中得到上述关系。因此被称为帕邢定律，上式称为帕邢公式。依据帕邢公式，可以画出如图的 V_s 随 pd 变化的关系曲线，称为帕邢曲线。由图中曲线可看出， V_s 首先随着 pd 的增加而降低，当达到一个最小值后，又随 pd 的增加而增加。即在某 pd 值时 V_s 有最小值。这一击穿电压最小值 $(V_s)_{\min}$ 的出现和确定是很重要的一个规律。实际应用中，通常希望降低气体放电的击穿电压。



上图表明，降低电源电压，增大匝间的距离等措施是设计线圈结构时优先考虑的方式，从一般小型真空感应电炉采用的单一感应线圈来看，两端子

之间（可认为电源电压）的电压最大，匝间电压相对电源电压来说很低，因此预防此类感应线圈放电的措施就是在设计时重点考虑降低电源电压，同时根据具体条件增大匝间距离（匝间距离一般在4mm-12mm，不能过大否则电效率会降低），在实际设计过程中，大部分的这种小型的线圈多采用200V-300V之间的电压，并且感应线圈不用采用特殊的匝间填充材料，基本不会导致放电现象（如图1所示），当两线圈串联时，两线圈相邻匝间电压瞬时值最大，电场强度也大，放电的可能性就高，因此想保持进电电压不变，并且有效地增大线圈的整体容器，可以采用两个线圈并联布置，设计过程中尽可能地采用同进电，同出点原则，放电的可能性也不会有太大的提高，所以大中型感应熔炼炉多采用并联方式预防放电情况发生，但是出于设备的成本及综合效率考虑，真空腔体的大小及感应线圈的整体体积都一定的限制，往往不能随意地增加匝间距离，工艺要求真空度很多情况下已经确定，那就要在匝间和电极引入部做好绝缘防护，现在普遍采用的是如图2所示的在感应线圈外部匝间填充绝缘材料，预防匝间放电，多采用玻璃丝布等材料对线圈做多层缠绕后，再做绝缘浸漆，增加绝缘性能，由于该方法有效可靠，被大多数设计和使用单位应用，但其后续的维修保养工序繁杂，缠绕玻璃丝布和绝缘浸漆干燥时间长，现在有部分对真空度和绝缘要求相对不高的企业采用直接在感应线圈铜材料表面涂刷超高温绝缘漆的来做绝缘，现在市场部分产品每mm厚度涂层耐压能力可以达到17000V。

二、真空感应熔炼技术的发展历程及现状分析

与传统的冶炼相比，真空感应熔炼节能，环保，工人作业环境好，劳动强度小，具有很大优势。利用感应熔炼技术，最终浇注的合金材料杂质更少，添加的合金比例更加合适，能够更加符合工艺对材料各性能的要求。由于具备了较先进的控温方式及合金成份熔炼过程中通过电磁搅拌能够很好的真空脱气，因此广泛用于科研与生产单位对镍基合金及特殊钢、精密合金、高温合金、有色金属及其合金在真空或保护气氛下进行熔炼和浇铸。1890年，瑞典技术人员发明了第一台感应熔炼炉。在1916年，美国人发明了闭孔式保温炉，感应加热技术逐渐进

入实用阶段。20世纪电力电子器件和技术的快速发展大地促进了感应加热技术的发展。大致可以分为以下几个其发展历程可以阶段：

（一）初步技术融合使用阶段（20世纪50年代-80年代）

1957年，美国开发出晶闸管作为电力电子技术的里程碑，标志着现代电力电子技术的开始和感应加热技术的革命。1966年，瑞士和西德首次使用晶闸管开发感应加热装置，标志感应加热技术开始迅速发展。该阶段主要应用领域是金属材料、合金材料等领域。这一阶段的真空感应熔炼设备简单，控制系统相对来说还不太完善，多依赖技术人员及操作人员的个人经验，对影响产品的关键性能指标的因素控制不是很精准，很难实现质量的稳定性和一致性。

（二）电子电器件迅速发展阶段（20世纪80年代以后）

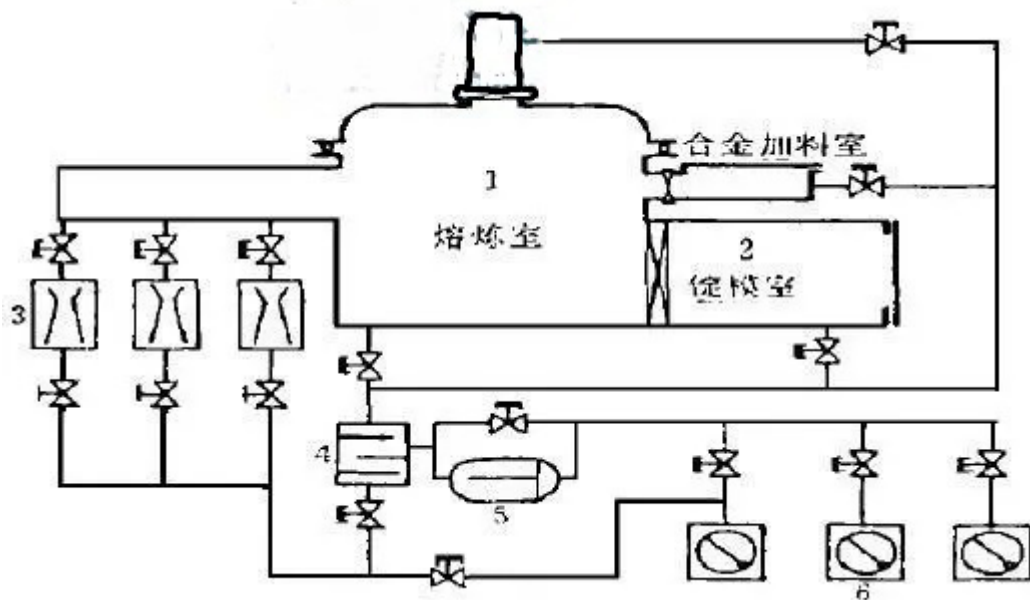
20世纪80年代以后，电力电子器件再次迅速发展，MOSFET、IGBT等器件纷纷出现。感应加热装置也逐渐开始采用这些新装置。IGBT用于更高功率应用，实现1000kW以上的感应功率，频率超过50kHz。MOSFET用于更高频率的应用。通常用于几千瓦的中小功率应用，频率可以达到500kHz以上，甚至几兆赫兹。

在此期间，真空感应熔炼设备已经开始实现自动化控制，控制系统的精度和稳定性得到了提高，促进了工艺的不断改进，产品的一致性及生产效率都有所改善。应用领域也得到了扩展，涵盖金属材料、合金材料的制备各领域，这些材料具有优异的力学性能、磁性能、耐热性能等，广泛应用于电子、能源、机械相关行业。

（三）现状分析

市场竞争越来越激烈，成本控制和产品质量是企业生存和发展的关键，因此，如何降低成本、提高产品质量，是当前企业面临的一个重要挑战。但由于感应加热本质上还是一个感性负载加热原理，由其会产生无功功率，整体的电炉效率70%左右，多数设备使用单位也是在熔炼控制过程中不断地调整工艺流程，加大单炉的单位产出量，以期降低单位能耗，对成本有效控制。

熔炼设备的设计单位也在不断地优化设备结构、



采用更加智能化的控制系统、更加精确的温度控制、更加稳定的真空度控制等措施,提高生产效率和产品质量,增强设备的市场竞争力^[3]。

以稀土材料的制备技术的真空感应熔炼炉为例,向多个真空室发展的趋势是十分明显的,在真空熔炼室的基础上可以多布置准备室、定模室、冷却室、加料室、回收室等几个真空室,可以共用一套真空系统,各真空室之间通过阀门连接切换,使熔炼用真空室始终处在真空状态,由于加料室或准备室的容积相比真空室小的多,一般情况下比熔炼室的体积要降低 2/3 左右,显而易见的降低了真空泵的使用频率和使用强度,以抽气速率 150L/S 的 H-150 滑阀泵为例,单台大型熔炼设备往往要设置 3-5 台 H-150 滑阀泵,以一天反复开启 5 次计算,一年内可以节约的成本约 20 万元。并且由于熔炼用真空室始终保持真空状态,保证生产的稳定性和安全性。

三、真空感应熔炼技术的发展趋势及展望

(一) 深入研究材料微观结构

随着材料科学的不断发展,对于材料微观结构的深入研究和理解将成为未来材料科学的重点。真空感应熔炼技术将继续发挥其在材料制备领域的优势,开始涉足到新型材料的制备领域,如高温超导材料、氢储存材料等。需要在温度、压力、速度等方面进行更加严格的控制,这些新型材料的研究和应用将极大地推动材料科学的发展和应用^[2]。

(二) 三维模拟及熔炼全过程的可视化

炉料熔化过程中的成分显示,熔炼时环境显示等还有待加强,电磁场、温度场等模拟可视技术亟待发展,尚未达到对熔炼过程的全方位控制和了解,相信在不远的将来三维模拟技术会对整个基于感应原理的加热技术有着极大的促进作用,为材料产品性能的提高提供理论和数字的依据。

(三) 结论及应用展望

在物联网和云技术等新兴技术的加持下,部分企业从以前的多人操作一台设备,实现一人可以同时监控、操作多台设备,真正实现了人工成本的有效降低,相信在可以预见的未来,真空感应熔炼技术可以真正的作为一个工艺过程和不可或缺的一环,融入到先进的智能制造之中。随着材料科学的不断发展和市场竞争的不断加剧,真空感应熔炼技术也将面临着新的挑战 and 机遇。

参考文献:

- [1] 俞志勇,赵永刚,徐明安.真空感应熔炼技术及其应用[J].航空材料学报,2007,27(1):7-13.
- [2] 卢文彬,童芳芳,熊文杰,等.真空感应熔炼技术及其在合金制备中的应用[J].材料导报,2012,26(10):107-112.
- [3] 李涛,邵丹,范恩民.真空感应熔炼技术及其在超导材料制备中的应用[J].无机材料学报,2010,25(5):517-524.