

软磁合金热处理的关键技术研究

方 嫵¹ 平秀民²

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 2. 首都航天机械公司, 北京 100076)



摘要: 通过深入了解软磁合金金属的材料特性和适用范围, 对提高软磁合金的磁性能的重要工序即热处理技术进行了系统性的研究。针对其特性制定合理的热处理工艺, 并结合工艺介绍了几种目前较先进的真空热处理设备, 从而可以有效避免该类合金经过热处理后质量不稳定、磁性能不合格等现象。

关键词: 软磁合金; 磁性能; 热处理工艺; 真空炉

Research on Key Technology Soft Magnetic Alloys of Heat Treatment

Fang Yan¹ Ping Xiuming²

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094;
2. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

Abstract: The key process to improve the magnetic property of soft magnetic alloys is heat treatment. By means of thorough examination of the alloys' material characteristics and applications, this paper elucidates the principles and technological characteristics of heat treatment processing for soft magnetic alloys to improve their magnetic performance. In particular, how to adapt heat treatment processing for the specifics of soft magnetic alloys are introduced. Furthermore, the paper introduces the structure, performance and characteristic of advanced vacuum furnace for the selection of heat treatment process. Combining all these, the performance instability and the unqualified magnetic property after heat treatment are avoided.

Key words: soft magnetic alloys; magnetic property; heat treatment process; vacuum furnace

1 引言

金属材料在航天工业技术的发展中起着至关重要的作用。其中金属磁性材料作为一种典型的基础功能材料, 用途广泛、种类繁多, 在力学性能、磁学性能等关键性能上都有显著的综合优势, 根据材料的不同磁导率及矫顽力, 可以分为软磁材料及硬磁材料。其中软磁合金广泛应用在航天器上, 主要用于磁放大器、电源变压器、各种继电器、电磁制动器、陀螺马达、陀螺锁定机构、力矩传感器、角度传感器、磁芯棒等关键件中。随着航天、航空、电子等高科技行业的发展, 软磁合金使用的领域范围迅速扩展, 市场的

需求量也越来越大。因此, 了解软磁合金的特性, 分析合理的热处理工艺对其磁性能的影响, 选用先进的热处理设备, 这些关键技术对提高产品性能和保证产品质量尤为重要。

2 常用软磁合金及其特性

软磁合金是一种在外磁场作用下容易磁化, 去除外磁场后磁感应强度又基本消失, 矫顽力很低的磁性合金, 属于精密合金, 它在磁性材料中是应用最广的一类。目前应用的软磁材料, 根据使用功率、频率要求不同、材料磁特性的不同可分为Fe-Si(硅钢)系、

Fe-Ni系（埃莫合金）、铁氧体系、非晶及纳米合金系和其它。

软磁合金的基本要求是在磁化或去磁时需要很小的磁场，即要求该材料磁滞回线较窄，矫顽力 H_c 较小。同时根据材料使用的具体条件提出了不同的磁性要求：磁屏蔽中（弱磁场中）使用的材料应当具有很大的初始导磁率 μ_0 及最大的导磁率 μ_{\max} ；对于用在恒稳磁场中的导磁体材料则要求有高性能的饱和磁感应强度 B_s 及最大的导磁率 μ_{\max} ；对于磁放大器铁芯材料要求磁滞回线具有窄的面积，小的矫顽力 H_c ，高的磁感应强度 B_s 及高的微变导磁系数；在交变电流应用时，材料要求有高的电阻系数，即低的磁滞损耗。由此可见，软磁合金材料的使用必须满足其磁性能的要求。而软磁合金的磁性能是靠热处理来实现和完成的。

3 软磁合金热处理原理

软磁合金的磁性能除了决定于合金的化学成分和存在于合金中气体和杂质的数量外，还取决于合金的组织结构。对于有序化转变的软磁合金，其有序度对于磁滞伸缩系数 λ_s 和磁晶各向异性常数 K 值有很大影响。软磁合金的组织结构又与热处理密切相关，通过热处理可以使合金导磁率 μ_0 、矫顽力 H_c 、磁滞损耗 W_n 以及有序化转变合金的磁滞伸缩系数 λ_s 和磁晶各向异性常数 K 值发生变化。

对于镍含量大于35%的铁镍合金，室温下该合金晶体结构稳定。当合金经过高温发生相变后，再由高温冷却到合金的居里温度时将会发生磁性的转变，合金中产生了许多均匀的自发磁化区域，该区域也称为磁畴，因此合金由顺磁性转变成铁磁性。

对于75%Ni-25%Fe的高镍合金，合金为单相固溶体。经过高温后，在冷却过程中，合金原子已经发生了有序化转变，将高温下的无序状态转变成按一定规律排列的有序化原子列状态，形成超结构相。对于这些合金有序状态是稳定的，但有序度不同。因此有序度影响合金 λ_s 和 K 值发生改变，导致合金的磁性能有所不同。

如何得到合金中我们所需要的有序度，即拥有较高的磁性能，取决于采用合理的热处理工艺。

4 软磁合金热处理工艺

4.1 高温真空退火

合金在加工过程中材料变形很大，有的变形达80%，在合金中晶格错位严重、变形，很多应力潜在材料内部，导致材料磁化困难。采用高温退火，合金温度升至600℃时，即可使合金内部组织变形的晶格得到恢复。继续升温，破碎的晶粒得到再结晶，再升温则晶粒长大。软磁合金变形组织的恢复以及一定的晶粒度有利于材料的磁化。金属零件在真空中的高温处理能防止氧化脱碳并具有脱气去除杂质效应。

为了使软磁合金达到所需求的磁性能，经过冷变形的合金一定要首先进行真空高温退火处理，其目的是为了消除加工引起的内应力，获得均匀的再结晶组织，净化合金去除杂质，并能得到理想的磁性能。

4.2 氢气保护气氛

由于软磁合金是一种敏感性极强的合金，零件运输、出炉时的碰撞或环境差异都会造成磁性能和量的不合格。尤其是铁镍系软磁合金的磁性能对杂质的存在很敏感，特别是类似碳、硫原子等都是不利的非磁性物质，它们夹杂在材料中形成化合物存在于晶界，阻碍晶粒长大，不利于磁性能的稳定和提高。常见合金热处理后的缺陷有：金属表面氧化、粘连、磁性能不合格。导致这些缺陷的主要原因是无法彻底有效排出有害的非磁性杂质。

因此，在软磁合金的热处理工艺选择中，将真空加热和氢气保护有机地结合起来，利用还原性气体氢气的化学反应快速有效地去除杂质。

合金在氢气保护退火时，要求氢气纯度高。氢气纯度越高，材料越薄，退火温度越高，杂质扩散速度越快。氢气的流量越大，杂质越容易从金属表面逸出，杂质去除得越干净。因此合金氢气保护退火处理所用氢气必须经过严格的净化。对于一般合金，氢气的纯度应控制在露点-40℃以下，含氧量小于2ppm；对于磁性能有较高要求的合金，氢气的纯度应控制在露点-70℃以下，含氧量小于1ppm。

4.3 降温过程

有些合金在高温下内部组织呈无顺序排列，在合金退火后的冷却过程中，当缓慢冷至600℃以下时，合金组织发生有序化转变，随之材料的磁性能也发生很大变化。合金内部组织的完全有序化或无序化都是不利的，必须有适当的有序化才能获得需要的磁性能，因此要想得到理想的合金磁性必须控制好不同的冷却速度，或者采用在磁场内比较缓慢的冷却方式。

针对不同种类的软磁合金，制定合理的热处理工

艺。严格按工艺要求控制升温速度、在退火温度保温足够时间、各阶段控制好氢气流量、采取合理的降温方式、控制降温速度。

5 软磁合金热处理设备

目前,国内外已经成功研制出真空氢气退火炉、真空磁场热处理炉等先进设备。解决软磁合金热处理常见缺陷的对策,最有效的措施就是选用以上先进设备,可减少工人繁琐复杂的操作过程,降低因人为操作不当对质量的影响。该设备把真空加热与氢气保护有机地合为一体,使合金在加热时有效地防止了氧化,也使材料最大限度地得到了净化。设备控温精度、自动化程度、炉温均匀性的提高不但能使材料得到良好的磁性能,还缩短了生产周期。

5.1 真空退火炉

一般电工纯铁或民用磁性合金,可以采用真空炉退火,真空炉设备的真空度应不低于 1×10^{-2} Pa。在真空条件下溶解在材料中的气体原子在高温下从材料表面逸出,但对于稳定的氧化铝、氧化硅等化合物没有效果。很多实践证明,磁性能要求较高的合金不宜用常规的真空退火炉进行退火。

5.2 真空氢气退火炉

该设备是把真空加热与氢气保护有机地合为一体的特殊真空退火炉,使合金在加热时有效地防止了氧化,也使材料最大限度地得到了净化;设备控温精度、自动化程度、炉温均匀性的提高使材料得到良好的磁性能。

真空氢气退火炉(图1)为单室加热结构:设备主要包括炉体、真空系统、氢气提纯送气、真空抽气系统及自动控制系统等。炉体由炉壳、炉胆、炉门组成,炉胆一般采用金属屏,以钼带做加热元件;真空系统由一套机械泵和罗茨泵组成;氢气的提纯送、排气系统由氢气流量计控制流量,经干燥、过滤、提纯使氢气露点达到 -70°C 以下,送入炉室,氢气进入炉室后,根据工艺需要设计了两种排气模式。一种按规定流量连续排出,另一种使氢气在炉室内保留一定时间,然后排出;自动控制系统是以智能化为核心,包括供电、控制、记录、监视、报警保护功能在内的电控系统,能满足复杂的工艺要求,并有故障自诊和监控功能。通过可编程序控制器(PLC)可实现真空炉的全自动运行。

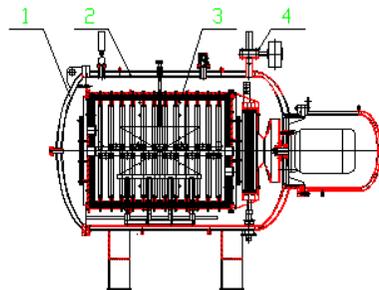


图1 真空氢气退火炉结构示意图

1—炉门 2—炉壳 3—加热室 4—氢气送气口

真空氢气退火炉主要技术指标:最高温度 1320°C ,极限真空度 6.5×10^{-4} Pa,工作真空度 6.5×10^{-3} Pa,控温精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,炉温均匀性 $\leq \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

真空氢气退火炉集真空炉与氢气保护炉的特点,具有真空炉的功能,同时还可在工作温度送入氢气(< 1 个大气压),使被处理材料最大限度地得到净化,保证了磁性能的稳定性和批生产产品质量的一致性。

5.3 真空磁场热处理炉

某些软磁材料在其居里温度附近退火过程中加一外磁场,可使磁滞回线呈矩形,磁导率增大,矫顽力降低,从而改善合金的综合磁性能。典型的真空磁场炉由环形磁场发生装置和真空气淬炉复合而成,由炉壳、真空抽气系统、加热系统、控制系统、电磁系统等组成,保证真空加热状态下磁场正常工作。

典型真空磁场热处理炉设备的主要技术指标:工作温度为 $400 \sim 1200^{\circ}\text{C}$,极限真空度 9×10^{-4} Pa,工作真空度 5×10^{-3} Pa,控温精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,磁场条件 $0 \sim 4\text{kA/m}$ 连续可调,炉温均匀性 $\leq \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

6 结束语

热处理是提高软磁合金的磁性能的关键工序,而影响其热处理的关键技术是合理的工艺制定和先进的热处理设备选择相结合的方式,使其具有更强的适应能力和更高的使用价值。

参考文献

- 1 中国机械工程学会热处理学会编. 热处理手册. 机械工业出版社, 2008
- 2 陈国钧, 等. 金属软磁材料及其热处理. 机械工业出版社, 1986
- 3 张善庆, 等. 软磁合金真空精密磁场热处理工艺研究. 航空材料学报, 2003
- 4 张以忱, 等. 真空材料. 冶金工业出版社, 2005
- 5 阎承沛. 真空热处理工艺与设备设计. 机械工业出版社, 1998

