

磁性材料的真空热处理工艺及设备

胡 勇, 高 峰, 郑庆强

(中山凯旋真空技术工程有限公司, 广东 中山 528478)

摘 要:磁性材料因其特殊的物理性能而被广泛应用于各个工业领域。在磁性材料加工成零件时需要进行热处理, 以达到零件的设计性能。在真空技术应用于热处理行业之后, 产生了一种新型的热处理工艺—真空热处理。与传统工艺相比, 真空热处理在很多方面都有着明显的优势。本文将结合我公司近几年来研发的几个型号的真空热处理设备, 并根据具体的零件, 对磁性材料的真空热处理工艺进行介绍。

关键词:磁性材料; 软磁材料; 硬磁材料; 真空热处理; 真空炉; 坡莫合金; 硅钢; 脱油

中图分类号: TG156.95 **文献标识码:** B **文章编号:** 1673-4971(2007)03-0035-04

Vacuum Heat Treatment Process and Equipment for Magnetic Materials

GAO Fen, HU Yong, ZHENG Qi-qiang

(Zhongshan Kaixuan Vacuum Technology & Engineering Co., Ltd., Zhongshan Guangdong 528478, China)

Abstract: Magnetic materials are widely used in industry as its special physical property. In order to reach the designed property, it must be proceeding by heat treatment while it to be parts. Since vacuum technology applied in heat treatment, a new heat treatment processes exists vacuum heat treatment, which has a distinct advantage in all respects in comparison with classical process. This paper has combined with the research and development in some vacuum heat treatment equipments by us in recent years and introduced the vacuum heat treatment of magnetic materials according to specific parts.

Key words: magnetic material; soft magnetic material; hard magnetic material; vacuum heat treatment; vacuum furnace; permalloy; silicon steel; deoiling

0 概述

磁性材料主要用于制作电工和电子产品零件, 广泛应用于输变电设备、家用电器、电机、电脑及军事设备等基础工业和高科技领域。根据材料磁性的特点, 磁性材料分为软磁材料和硬磁材料 (亦称为永磁材料)。软磁材料在磁场内磁化后表现出强磁性, 离开磁场后磁性基本消失, 主要有坡莫合金、电工硅钢和电工纯铁等; 硬磁材料磁化后则具有永久的磁性, 不容易退磁, 主要有钕铁硼合金、铝镍钴合金和

铁氧体等。在将磁性材料由原材料制成零件的过程中, 必须进行热处理, 以达到零件的设计功能。我公司曾经研制过多台套真空热处理设备, 用于磁性合金的处理。在调试过程中, 我们与用户一起对热处理工艺进行过一些摸索和试验, 在热处理工艺和设备结构设计方面积累了一定的经验。本文主要介绍磁性合金的真空热处理工艺及设备, 并根据一些典型的工件, 结合我公司生产的几台较为典型的真空炉, 重点介绍软磁材料的真空热处理工艺。

收稿日期: 2007-04-04

作者简介: 胡勇 (1976-), 男, 主任工程师, 主要从事真空热处理炉的研发工作。

1 软磁材料的真空热处理

软磁合金的原材料主要为棒材、带材和板材等,零件以冷加工的方式切削、冲剪、冲压或卷绕成形。在加工过程中,材料原有的晶粒组织将被破坏,使得材料的导磁性能下降,同时加工过程中产生的加工应力将导致零件尺寸的不稳定。所以由软磁合金制作的零件,加工成形后必须进行退火,使材料重新获得有规则的等轴晶粒组织,并降低材料中的杂质含量,恢复和提高材料的磁性性能,同时消除加工应力,稳定零件尺寸。

根据材料和使用要求不同,软磁合金零件的退火可采用高温退火(1150~1250)和中温退火(800~850)。其中高导磁材料的坡莫合金通常采用高温退火,有时为进一步提高导磁性能,还要采用磁场退火^[1];而对于变压器、互感器或电机的成叠或成卷的硅钢片(通常称为铁心)则采用中温退火^[2]。

在引进真空炉之前,很多厂家采用的是井式外热式气氛炉,通过氮气或氢气保护的方式进行处理,这种处理方式存在明显的缺陷,尤其是在采用氮气作为保护气氛时。首先,采用氮气保护的方式处理时,炉内通过氮气置换获得的气氛纯度不够,氮气的流向对工件的表面质量影响较大,常有同一炉零件处理后颜色不一致的现象。这是由于炉内存在氮气流动不畅的区域,部分工件出现轻微氧化所致。其次,外热式炉的温度均匀性较差,处理后的零件性能差异较大,合格率低。此外,在能耗方面,外热式炉的炉衬较厚,加热过程中消耗在炉衬上的功率大,热效率低;在加热过程中需不断充入高纯氮气,氮气消耗量大;耐热钢炉罐在高温下的使用寿命低等,导致外热式炉的运行成本较高。如采用氢气作为保护气氛,依靠氢气较强的脱碳能力和还原作用,工件的性能和表面质量得以提高,但温度不均匀和运行成本高的问题仍然不可避免。

内热式真空退火炉的使用,对软磁合金零件退火的意义极为重大。无论是在工件处理效果、运行成本方面,还是在生产效率、生产环境方面,内热式真空炉都具有明显的优势。下面将分别介绍不同种类零件的真空退火工艺及相应设备。

1.1 坡莫合金的真空退火

坡莫合金属于高导磁材料,常用于家电、电工及军工方面作为高灵敏度控制元件。坡莫合金主要成分是铁和镍,另有少量的钼、钨、铜等合金元素。在坡莫合金中,对于碳的含量需要严格控制。如果材

料中渗入微量的碳,其性能将大幅度下降。因此,为了避免碳的渗入,用于坡莫合金退火的真空炉,其内部应尽量避免活性碳原子的存在。坡莫合金退火的温度通常为 1150~1250,石墨炉在该温度下会出现轻微的渗碳气氛,所以多采用钼片式真空炉,其加热元件和反射屏均由金属钼制作。

坡莫合金零件通常是经过研磨抛光后再进行处理的,处理后不再进行加工,所以退火后零件的表面质量要求高。由于坡莫合金零件的尺寸通常较小,形状规则,容易烧透,所以工艺过程中的升温阶段没有特别的要求。当然,对于一些外形尺寸较大,形状特殊的零件,在编制工艺时,仍然要考虑加热变形和透烧的问题。在真空度方面,从降低材料中杂质和利于晶粒生长的角度考虑,坡莫合金退火的真空度应保持在 10^{-2} Pa 数量级内。

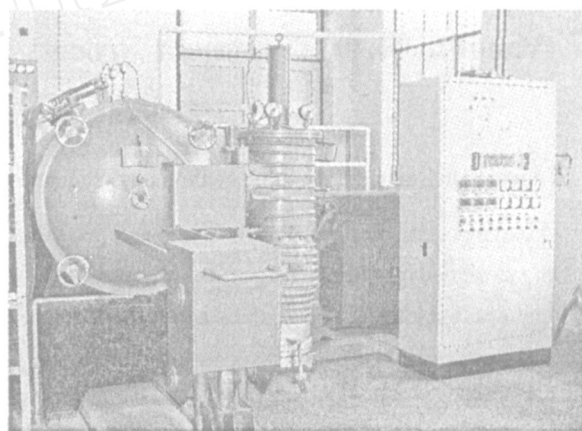


图 1 WZT-100型真空磁场退火炉

我公司于 2002 年 6 月为电子部合肥三十八所提供了一台坡莫合金退火炉(见图 1)。该炉内部设有线圈和引入电极,通入直流电可产生磁场,具备磁场退火的功能。该炉型号为 WZT-100,其主要性能指标为:

有效工作区:	300 mm × 300 mm × 600 mm
最高温度:	1300
炉温均匀性(九点测温):	±5 (600), ±3 (800)
加热功率:	3 × 20 kW
极限真空度:	4.0×10^{-3} Pa
压升率:	0.4 Pa/h
操作方式:	手动/自动

图 2 是一个圆环形工件的退火工艺,工件外圆 $\phi 100$,内孔 $\phi 60$,厚度 16,材料为 1J79,装炉量 40

kg。处理前工件用清洗剂清洗后晾干,操作人员带干净纱手套装料。通过旋片泵和罗茨泵抽真空至 10 Pa 以下后,开高真空阀,用扩散泵抽高真空,8~10 分钟后真空度达到 8×10^{-2} Pa,此时便可启动温控仪进行加热。

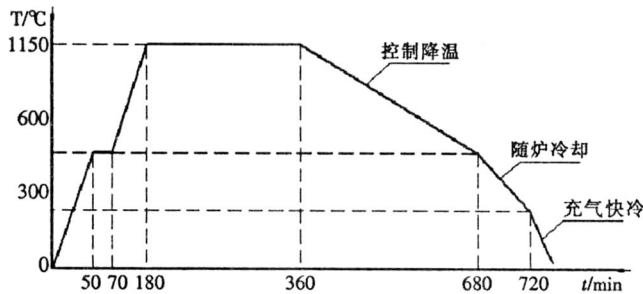


图 2 坡莫合金零件退火工艺

由于该零件有一定厚度,在升温曲线的 600 处设置了一个 20 min 的均温平台,继续升温至 1150 保温 250 min 后,从 1150 到 600 的降温时间 300 min,然后随炉冷却至 300 后,充氮快冷出炉。

坡莫合金零件退火工艺的关键是保温时间和降温速度的控制。保温阶段是合金元素充分溶解并均匀化的过程。从 1150 降温至 600 的阶段是材料的晶粒形成和生长的阶段,必须控制其降温速度,才能获得理想的组织。因此,在这个降温阶段,需采用程序控制,在降温过程中加热器仍然有功率输出。

经过上述工艺处理后的零件,经测试,各项指标均达到规定的要求。对于不同形状的零件和不同的装炉情况,升温阶段的时间可作相应的调整,但第一段降温曲线应严格按照材料的要求确定。

1.2 大型硅钢叠片铁心和硅钢带卷绕铁心的退火

硅钢为含硅量为 0.8%~4.8% 的钢^[1]。在变压器制造行业中,大量使用硅钢(通常含硅量为 2.8%~4.8%)制作的铁心作为变压器的导磁元件。变压器工作时,铁心发热造成的功率损耗被称为“铁损”,是变压器的重要指标之一。铁心的发热主要是铁心本身的磁阻和交变磁场下产生的“涡流”所造成的。铁心采用叠片或卷绕成形的目的就是要减少“涡流”造成的影响,而铁心的磁阻则取决于铁心的导磁性能。在硅钢片冲剪或卷绕等冷加工过程中,会破坏材料原有的晶粒组织,改变材料的磁性取向,导致变压器的空载损耗提高 5%~30%^[2],故必须通过退火处理重新获得理想的纤维组织,使材料恢复原有的

磁性性能。

变压器铁心叠片或卷绕后,需通过夹具夹紧,再装炉处理(见图 3)。通常一个铁心重量为 200~2000 kg 不等,且每炉要处理多个铁心,以降低生产成本,所以用于铁心退火的真空炉需要有很大的装炉量。

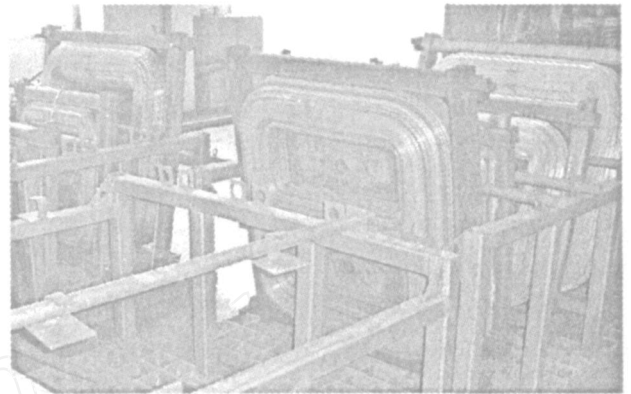


图 3 待处理的变压器铁心

由于变压器铁心体积大,重量大,截面尺寸大,所以退火炉的设计及退火工艺的编制方面与常规炉相比有一些特殊的地方。由于铁心截面尺寸大,导热性能差,而真空炉的体积也较大,所以整体蓄热量大。在加热方面,除了加热功率方面的考虑之外,还应采用大辐射面积的、高效率的加热器。通常用于退火处理的真空炉,对于冷却速度没有特别要求,但从提高生产效率的角度考虑,铁心退火炉应具备一定的冷却能力。

自 2003 年至今,我公司已经为多家变压器厂提供过装炉量为 5 T、8 T 和 15 T 等几种规格的内热式真空铁心退火炉。

图 4 是截面直径 $\phi 280$ mm 之铁心的真空退火工艺曲线,装炉量 5 T,其中 x 轴以下的曲线表示炉内的真空度。

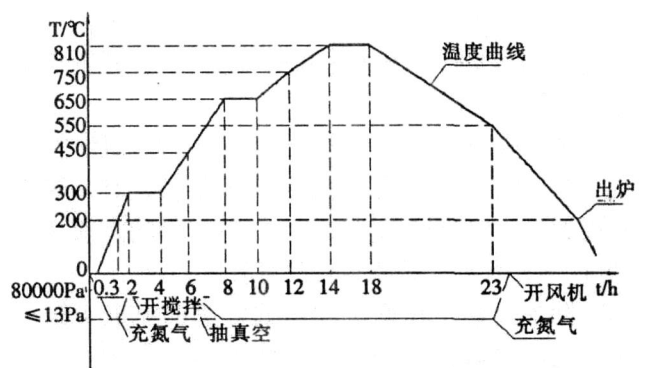


图 4 变压器铁心退火工艺

退火工艺中,升温阶段的基本原则也是保证透烧,也就是保证工件的心部温度与表面温度一致。在 300 以下采用真空加热,主要目的是通过烘烤和抽空,排除绝大部分的杂质气体。从 300 ~ 450 ,采用充氮保护加热,提高加热速度,减小工件内外温差。450 以后采用真空加热,控制加热速度,设置保温平台,保证工件整体均匀升温。至 810 保温后,进入控制降温阶段。此时,材料内部的原子扩散能力强,开始进行晶粒修复,晶格畸变现象逐渐消除,在真空作用下,内部的碳、氮、氢等杂质也不断扩散到表面然后排除。在温度降至 550 后,即可充入高纯氮以加速冷却过程,开启冷却风机的时间可根据生产需要来确定。

硅钢铁心经上述工艺真空退火后,各项指标均达到或超过国家标准,表面保持硅钢片原有的质量,同一炉产品性能完全一致,不存在返工或报废的现象。此外,内热式真空炉与外热式退火炉相比,热效率较高,铁心的耐热钢夹具不会因氧化而损耗,极大地降低了生产成本,经济效益明显。

1.3 小型硅钢零件的真空退火

在家用电器、电子设备、电脑配件等行业,经常会用到一些小型变压器或互感器。这些器件也采用硅钢制作的铁心,只是外形尺寸较小,形状规则,批量生产时数量很大。这类铁心通常采用硅钢片冲压后叠片成形,同样需要进行退火处理。在退火工艺方面与其它硅钢零件相同,但该类型的工件有一个特别之处:工件冲片过程中附着的冲压油,在叠片后被夹在片与片之间,通过常规的清洗无法去除。冲压油被带入真空炉内,将造成真空炉室的污染,导致绝缘件失效,并严重影响抽真空。同时冲压油随工件经高温焙烧后将有碳黑附着在工件表面,加上数量多,基本无法进行清除,对工件的性能指标和表面质量均造成严重影响。

我公司在 2006 年为日本电产东莞公司提供了一台 WZT - 500 型真空退火炉,专门用于硅钢小铁心的处理(见图 5)。

该炉在设计过程中考虑了工件的特殊性,在处理过程中增加了除油工艺,系统上专门设有一套除油装置,在冲压油对设备和工件造成影响之前将其脱除,从而保证了设备运行的可靠性。

除油过程是在低于冲压油分解的温度下进行的。通过抽真空将炉内压力降到其饱和蒸汽压以下,同时升高炉内温度,在两个因素的共同作用下,

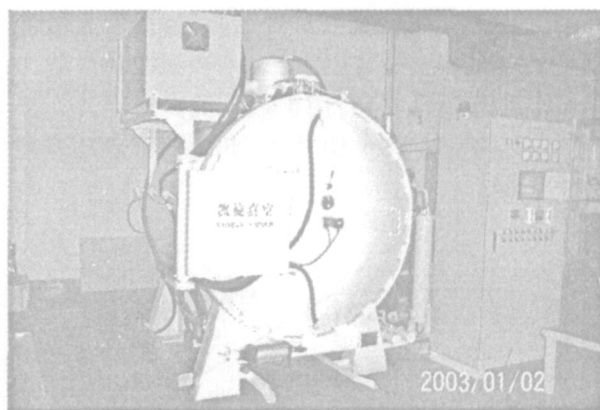


图 5 WZT - 500 型真空铁心退火炉

加快了油的蒸发速度,从而将油以蒸汽的形式排出。油蒸汽排至炉外后,不能进入真空系统,否则将混入真空泵油中,使泵的抽气能力急剧下降。因此,在油蒸汽进入真空泵前,应通过冷凝装置将其冷凝下来,然后排到系统外。

通过以上处理,零件退火后表面光亮,与进炉之前的状态相同,炉膛内的绝缘件依然保持原色,从脱油器中可放出大量的油,说明该设备的脱油效果很好。该设备从 2006 年 10 月交付使用至今,运行稳定,处理的零件各项指标良好,得到用户的好评。

2 硬磁材料的真空热处理

硬磁合金制作的零件大多以粉末冶金的方式成形,然后再进行固溶处理或退火,所以硬磁材料工件的热处理主要是真空烧结、真空固溶处理和真空退火。由于对钕铁硼和铝镍钴合金材料需要严格的控制碳的含量,所以硬磁合金零件无论是烧结,还是固溶处理,真空炉的加热元件和反射屏等都应采用钼片制作。

硬磁合金零件是将粉末与粘接剂混合均匀后,在模具中冲压或挤压成形的。在烧结过程中,由于粘接剂的存在,在 300 ~ 600 之间,工件会产生一个放气的高峰,在 900 ~ 1000 之间,又会出现第二个放气的高峰 [3]。所以,用于硬磁合金烧结的真空炉应配置较大抽速的扩散泵,以免出现氧化现象。

硬磁合金零件烧结成形后,有些需要进行固溶处理,使材料的成分均匀,组织稳定,从而提高其永久磁性。由于固溶处理对冷却速度有一定要求 (> 100 /min),故固溶处理可采用钼片式加压气淬炉进行。

(下转第 49 页)

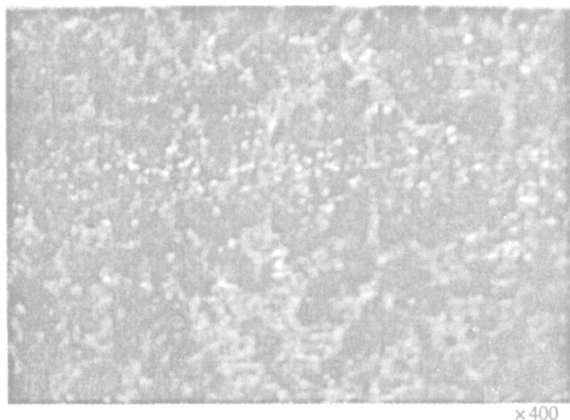


图 5 摆线轮断口显微组织

GCr15 钢正常的淬火低温回火组织应该是细小的回火马氏体(包括暗黑色隐晶马氏体和较白些的结晶马氏体)+均匀分布的细小粒状碳化物+少量残余奥氏体^[4]。现在,金相检验结果表明有网状碳化物。通过材质检验发现,原材料中的碳化物主要为网状碳化物,且网状碳化物为 4 级,属于不合格组织。网状碳化物的出现有两种可能,一是淬火加热温度过高,冷却速度又过慢,导致碳化物网状析出;另一种可能是球化退火不充分,GCr15 是过共析钢,原始组织中有网状碳化物,如果球化不充分,则会遗留到淬火回火后的组织中,使钢在晶界上具有一层脆硬的外壳,急剧地降低钢的强度和韧性,增大材料的脆性^[5,6]。从金相组织来分析,不应该是前者。因为如果淬火加热温度过高,所获得的马氏体应该是针状马氏体;如果冷却速度太慢,则应该不是隐晶马氏体而是贝氏体;而淬火加热温度过低,则应该是回火托氏体。根据金相检验结果,淬火回火后的组织为细小的隐晶马氏体。由此分析,网状碳化物很可能

是球化不充分所致,或者说原材料中网状碳化物太严重,仅通过球化退火并不能完全消除。

基于上述分析,为了验证分析结果的正确性,我们在严格控制原材料中点状夹杂物的基础上,对摆线轮的加工工序作了修改,即在球化退火前进行高温正火,为球化退火做准备,以期消除网状碳化物,其余成分及工艺没有多大改变。结果没有出现断裂现象。

2 结论及建议

1)从理化检验结果分析和生产验证结果来看,该批摆线轮发生脆性断裂主要是由于球化退火不充分及原材料中非金属夹杂物超标所致。

2)在球化退火前对材料进行高温正火处理,保证淬火前的组织正常,可有效避免 GCr15 钢摆线轮发生脆性断裂。

建议:加强原材料的检验,确保其成分、组织及各种缺陷在标准允许的范围,控制球化退火工序。

参 考 文 献

- [1] 钟培道. 断裂失效分析 [J]. 理化检验 - 物理分册, 2005, 8: 427 - 431.
- [2] 方昆凡. 工程材料手册(黑色金属材料卷) [M]. 北京: 北京出版社, 2002.
- [3] 白万真, 魏世忠, 龙锐, 许春伟, 季英萍. 冷轧辊典型失效形式分析综述 [J]. 铸造技术, 2006, 9: 117 - 121.
- [4] 杨金生. 调速电动机行星摩擦轮断裂分析 [J]. 北京石油化工学院学报, 2000, 1: 53 - 56.
- [5] 赵宇, 陈莉, 艾亮. GCr15 钢碳化物细化处理工艺及其性能的影响 [J]. 轴承, 2006, 2: 27 - 30.
- [6] 李爱民, 巫哦, 叶健熠. 热处理工艺对 GCr15 钢断口特征的影响 [J]. 轴承, 2005, 4: 22 - 25.

(上接第 38 页)

3 结束语

磁性材料采用真空热处理技术,无论是在提高零件品质、降低生产成本方面,还是在改善生产环境方面,都有着极其明显的优越性,所以是一项值得推广和长期研究的技术。我们衷心希望广大的用户了解和使用它,也希望有更多的热处理工作者和科研人员投入该技术的研究工作,使其日臻完善,更好地服务于广大用户。

参 考 文 献

- [1] 变压器制造技术丛书编审委员会. 变压器铁心制造工艺 [M]. 机械工业出版社.
- [2] 谢毓城. 电力变压器手册 [M]. 机械工业出版社.
- [3] 阎承沛. 真空热处理工艺与设备设计 [M]. 机械工业出版社.