

轻工电热技术问答丛书

DIANRE YUANJIAN YU QIJU JISHU YINGYONG JI SHIJIAN

电热元件与器具技术 应用及实践

■ 陈福江 主编



东北大学出版社
Northeastern University Press

轻工电热技术问答丛书

电热元件与器具 技术应用及实践

陈福江 主编

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 陈福江 2017

图书在版编目 (CIP) 数据

电热元件与器具技术应用及实践 / 陈福江主编. —
沈阳: 东北大学出版社, 2017. 9
(轻工电热技术问答丛书)
ISBN 978-7-5517-1646-8

I. ①电… II. ①陈… III. ①电热设备—加热元件—
研究 IV. ①TM924.03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 191632 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83683655(总编室) 83687331(营销部)

传真: 024-83687332(总编室) 83680180(营销部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 160mm×228mm

印 张: 15.75

字 数: 266 千字

出版时间: 2017 年 9 月第 1 版

印刷时间: 2017 年 9 月第 1 次印刷

责任编辑: 孙德海

封面设计: 潘正一

责任校对: 曲 直

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1646-8

定 价: 49.50 元

编 委 会

主 编 陈福江

副主编 何 清 张 剑

编 委 邹德斌 杨学群 俞为扬 盛建寅

倪伟男 芮炎祚 李文良 谢振华

韩卫东 严伟东 彭春兰 付晓莉

王 彦 李楠楠 匡德舜 李 乐

熊 茜 徐 蕊 高茜茜 孙 莉

杨晓晨

前 言

电热元件与器具的发展是一个不断完善的过程，电热元件与器具技术应用及实践研究是该领域中极为重要的一环，其中的理论知识涉及许多学科的内容，所以电热元件与器具发展也需要专业理论知识面更广、内容更新、水平更高的科技读物。

为此，编者从该行业目前的实际情况出发，兼顾将来的发展趋势，着眼于理论联系实际，并吸取全国电热元件与器具技术交流会的成果结晶，编写了“轻工电热技术问答丛书”第二部《电热元件与器具技术应用及实践》一书，书中述及的内容包括理论、应用、实践与检测诸多方面。

本书必将对该行业科技进步发展和实际工作起到促进和推动作用。

本书适用于从事该行业的企业及管理部门的管理者和专业技术人员，对该技术有研究的各科研院所、大中专院校相关技术人员、学者、学生，与该行业有关的上下游产业相关研究人员等。

陈福江

2017年7月

目 录

第一章	材料选择与应用	1
一、	电热元件发展现状	1
二、	高蠕变强度高温合金电热丝技术研究	8
第二章	理论与分析	12
一、	半圆电加热元件加工过程中电热丝受力分析	12
二、	单头管(采用有芯杆绕丝结构)在通电加热时管表面温度均匀性的分析	13
三、	面积负荷与试验条件的匹配性	17
四、	电热元件能效评价方法研究	20
五、	热积聚对电热元件性能的影响和新品开发的方向探索	27
六、	商用电开水器的节能分析	33
七、	放置于自由空间通电加热时管表面温度与管表面负荷之间关系	38
第三章	设计与计算	43
一、	电热水龙头专用电热元件的设计与成形	43
二、	铸铝(铜)等加热器(圆环形)各点温度均匀性的保证措施	49
三、	金属模具电加热功率的计算	53
四、	搪瓷双内胆节能电热水器的研制	54
五、	异形电热元件的设计与计算	60
六、	电阻炉的设计	65

第四章	工艺分析	69
一、关于电加热管防腐的整体要求与工程实践	69	
二、PTC 电加热器的散热铝波纹条钎焊技术的研究	75	
三、浅谈咖啡机锅炉制作工艺及结构	82	
四、干烧管在使用领域的工艺区别	89	
五、快热式电热水器模拟控制技术	92	
六、电热元件热态泄漏电流与氧化镁芯杆的关系	97	
第五章	缺陷分析与解决方法	103
一、管状电热元件中的筛子(分筛)效应的种类、危害性和解决的办法	103	
二、解决不锈钢基体厚膜加热元件曲面印刷难题	106	
三、铜质水煲管常规工程设计失效现象的汇总和分析	111	
四、不锈钢水煲管常见工程设计失效现象的汇总和分析	121	
第六章	类别与性能	136
一、金属异形电加热元件	136	
二、电热膜技术的应用	139	
三、热水器专用钛加热管简介	142	
第七章	应用研究	143
一、炉中镍钎焊接工艺在水加热管上的应用	143	
二、不锈钢发热管干烧表面熔融现象问题浅析	151	
三、CS1008 水龙头加热管质量分析	155	
四、电热管质量问题案例分析报告	159	
五、电磁加热技术的发展及在“匚”式电压力锅上的设计	169	
六、关于内置式熔断器洗衣机电热管介绍	178	
七、铝基材料炉中钎焊的一系列工程应用技术研究	181	
八、制造、加工电热元件设备的六个应用特点和一些加工的技术性要领	185	
九、超负荷加热元件寿命问题的解决方法	190	

第八章 性能检测	193
一、功率检测	193
二、电气强度检测	198
三、电加热管快速寿命试验	205
附录 发明与创新(专利介绍)	207
一、复合碳化硅电热元件及其生产方法	207
二、干点型氮化硅电热元件及其制备方法	210
三、高温铝合金基稀土厚膜电路电热元件及其制备技术	215
四、一种无芯碳纤维螺旋体电热元件的制备方法	224
五、电热元件及具有该电热元件的电热交换器	228
六、水壶加热器板用的电热元件	232
七、水壶加热器板用的电热元件	236
后 记	241

第一章 材料选择与应用

一、电热元件发展现状

电热元件是实现电能向热能转化的一类元件，各种电热设备都要使用电热元件来发热。电热元件从问世的那一天起，就在人们的生产生活中担任着重要的角色。电热元件的类型较多，若按照元件的材质分析，可分为两大类，即金属与非金属类。金属类电热元件常用的材质有贵金属、重金属及其他的合金材料。非金属类电热元件常采用钛酸钡(PTC材料)、碳化硅、石墨等。家电电热类产品在选用电热元件时，根据电热元件的工作原理及性质，可以采用不同的加热方法，如电阻加热、感应加热、微波加热、电弧加热、红外线加热等。本书主要对近年来在市场上应用较广的各类电热元件的情况做简单的介绍。

(一) 电热丝

电热丝是最早出现的一种电热元件，它是以电热为基本工作原理来实现能量转化的。电热丝虽然为传统电热元件，但至今尚未被替代，现在电热丝依然在各个领域，特别是工业生产及实验室中被广泛使用。

电热丝的工作原理主要是采用电阻加热的方式，通过直接加热和间接加热两种方式，将电能转化为热能。采用直接加热的电器是将电热元件直接接在电源电路中，并用分压电阻或电压调节器控制电热元件的工作电压或工作电流，以实现稳定加热。间接加热时，电源电流加载电热元件后，分别通过传导、对流、辐射等间接形式，将热量传递到被加热体上。电热丝在近年来多采用铁铬铝合金和镍铬合金，铁铬铝合金的最高温度已经达到了 1400°C 。在电热丝的基础上，近些年发展出了电热棒、电热盘、电热片等电热元件，但它们的本质依然是电热丝，其原理也脱离不了电热。

电热丝的优点是加热温度和耐热温度高、技术成熟、易于制造且方便配套应用于各种电热设备。电热丝的缺点是能量转换率较低，发热过程中伴随着发光过程，因此电能转换率只能达到 60%~70%。铁铬合金电热丝的优点是运行温度高、使用寿命长、电阻率高、表面负荷高，并有较好的抗氧化性。铁铬合金电热丝的缺点是在高温环境下的强度较低。随着温度的升高，铁铬合金电热丝的可塑性会增强，也就是说，铁铬合金电热丝在高温中容易发生形变且变形后不易修复。镍铬合金电热丝的优点是在高温环境中的强度高，长期高温运行不易变形，不易改变结构，且镍铬合金电热丝的常温塑性很好，变形后的修复也相对简单。此外，镍铬合金电热丝的热辐射率高，不带磁性，耐腐蚀性优良，使用寿命长。但其缺点是运行温度相对较低，且镍金属的价格相对较高，因此镍铬合金电热丝的成本较高。

（二）碳纤维发热材料

进入 21 世纪以来，随着各种纤维材料增强技术逐渐变得与结构设计同样重要，电热丝的制造材料出现了一个新型的品种——碳纤维电热丝。碳纤维材料的发展先后引起了诸多发达国家和发展中国家的关注，才有了今天碳纤维材料大力发展的形势。碳纤维发热体是 21 世纪最具竞争力的高科技材料，它的出现在电热领域掀起了一场新的革命，碳纤维发热体替代金属发热体将成为一种必然的趋势。碳纤维电热管是一种区别于金属丝、卤素等传统电热管的高科技产品，具有使用寿命长、电热转换效率高、红外线辐射、健康环保等优异性能。

碳纤维电热丝的电气性能稳定。碳纤维石英电热管通电以后，在频繁启动、关闭和长期连续工作中，功率稳定，不会产生瞬间功率冲击。碳纤维电热丝在电热转换过程中，可见光很少，电热转换效率相对传统的合金电热丝而言提高到 95% 以上，比镍、铬、钨、钼等材料作为发热体的加热器，可节能 30%。在相同功率下，辐射温度比镍铬金属电热管高 30℃，比钨钼丝石英电热管高 15℃。发出的红外线，被人体、衣物、水等直接吸收性特别强，在热传递过程中热量损失小，对碳水化合物吸收更强，有良好的碳原子谐振效应。碳纤维发热丝具有升温迅速、热滞后小、发热均匀、热辐射传递距离远、热交换速度快等特点。

在我国，东华大学的潘鼎教授研制成功了性能稳定、质量合格的航天级高纯黏胶基碳纤维，不仅填补了国内空白，而且为国家战略武器用

碳纤维材料的发展奠定了基础。四川大学冯博等于 2013 年采用高密度聚乙烯(HDPE)、石墨、碳纤维制备高导热、高强度的复合材料。通过 SEM 照片考察高密度聚乙烯/石墨/碳纤维复合体系的微观结构;研究石墨及碳纤维的加入是否可以形成导热通道以及随着石墨添加量的提高,复合材料的导热性能及其力学性能的变化。研究出当石墨的质量分数为 60%、碳纤维的质量分数为 5%时,复合材料的导热系数达到 $7.938\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,是纯 HDPE 的 20 倍。现阶段碳纤维加热技术已经得到了不断的扩展,考虑到我国对碳纤维的应用还在不断发展,许多用途还有待开发,碳纤维在我国将会有极为广阔的发展前景。

(三) 厚膜电阻加热材料

厚膜发热元件是指在基体上将发热材料制成厚膜,进行通电发热的发热元件。这是一种新型、安全、环保、使用寿命更长的加热方式。

现在广泛使用的厚膜电阻加热元件,外形美观、功率高、加热效果明显、耐压更高、工艺成熟、使用寿命明显提高,已经得到广泛的应用,取代了原来造型单一的管状发热器,加热范围更广,弥补了原来 PTC(Positive Temperature Coefficient)加热元件加热范围窄的问题。厚膜电阻作为新一代的电阻,以其显著的优势,正被广泛地应用。

传统厚膜电阻材料由三种成分组成,即功能相、黏结相和作为溶剂的有机载体。功能相是体现材料特性的关键,是主要研究对象;黏结相,起到黏接的作用,经过高温处理后,有机载体挥发,黏结相熔化成液态,冷却后,不仅将功能相的粉体黏接在一起,也将厚膜与基片黏接在一起;有机载体是在丝网印刷工艺中必须使用的部分。目前,发热厚膜电阻材料按导电填料种类可分为:贵金属厚膜电阻材料和低成本碳系厚膜电阻材料。前者采用钌、金、铂等贵金属及其金属氧化物作为导电填料的贵金属材料。如 E. I. 内穆尔杜邦公司的厚膜材料专利 201280031186.6,就采用了粒状 Pt 合金及其金属氧化物复合物。这种类型导电材料的优点是工作温度高、稳定性好、不易被氧化。国内也对此类电阻材料进行了研究,国防科学技术大学提出了以银、钯为导电填料的电阻材料;湖南利德电子材料有限公司推出的用于不锈钢基板的厚膜电阻材料 D2430XXXX,导体材料 DT4306,DT4306A 都是以贵金属为导电填料。虽然采用贵金属作为导电填料具有加热温度高、不易氧化、工艺成熟等优点,但贵金属成本高昂,且添加作为无机黏结剂的玻璃相会

对电性能造成较大影响,使得贵金属厚膜电阻材料及其导体的广泛应用受到很大限制。PTC 厚膜电阻材料主要应用于热敏电阻领域,一般也采用钨、金、铂等贵金属及其氧化物辅以氧化铜等添料作为添加剂调节 PTC 特性。由于主要导电调料依旧采用贵金属,成本依旧高昂。基于前者成本方面缺乏优势,应用于低温领域、成本低廉、工艺成熟、使用碳纤维作为导电填料的碳纤维厚膜发热材料随即产生。目前国内外对使用低成本金属氧化物作为发热功能相的电阻材料研究较少,国内已经出现使用导电碳粉作为功能相材料的导电材料,如陕西科技大学提出了一种以石墨为导电填料、无机玻璃粉作为黏结相的环保型石墨电阻材料,西安宏星电子材料科技有限责任公司则提出了以纳米碳系为导电填料的发热器用电致热有机功率电阻材料。虽然以石墨、碳纤维为代表的有机电阻材料能有效降低材料的生产成本,但是工作温度低,一般低于 300°C 。现阶段,桂林电子科技大学研制的基于 YBCO, LSMO 等贱金属氧化物作为导电填料的低成本厚膜电阻材料,不仅具有贵金属电阻材料工作温度高、稳定性好、热效率高等特点,而且兼具了低成本、工艺简单等特点。

(四) PTC 电热元件

PTC 的全称是 Positive Temperature Coefficient,是一种具有正温度系数的半导体发热元件,或者说是一种具有正温度系数的热敏电阻。它是将导电材料经过复合烧结而成的一种电热元件。PTC 电热元件是继电热丝之后出现的一种电热元件。1961 年,日本村田制作所的佐份利等人在世界上首先使 PTC 实用成功。1962 年,用 PTC 新材料制成的产品被选为日本工业新闻的十大产品之一。1964 年,PTC 开始应用到家用电器上。70 年代进入高速发展时期,并开始进入到家用电器的各个领域。我国对 PTC 的研究始于 70 年代,最初只用于电视机的启动及消磁,从 80 年代开始研究和应用于电热器。

PTC 电热元件的优点是加热时无明火,加热效率可达 70%。PTC 电热元件的缺点是抗震性能差、不能随意切割使用,特别是 PTC 电热元件受居里温度的限制,不能用于 350°C 以上的加热。因此,PTC 电热元件在实际生产生活中的应用只能局限在低温加热领域。

近年来出现的高分子 PTC 材料是一种复合材料,将绝缘的有机高分子聚合物材料和某些无机导电填料复合加工而成,称为聚合物 PTC 材

料。其中,高分子材料作为聚合物 PTC 材料的基体材料,在整个聚合物 PTC 材料中起骨架和填料载体的作用。无机填料则是导电成分,在绝缘体中形成连通的导电网络,起电流通道作用。高分子 PTC 材料不仅综合了无机填料的导电性和高分子材料优良的力学性能与加工性能,还具有两单组分者所不具有的新的物理性能,充分体现了复合材料的特点和优点。

高分子 PTC 材料导电填料主要有炭黑、石墨、金属粉末或纤维以及某些导电性氧化物等。由于金属填料热氧化和对基体老化的催化作用,石墨碳纤维对基体力学性能破坏较大和复合材料均匀性差等原因,实际中很少采用氧化物类的导电填料,如 TiO , Ti_2O_3 , VO_2 , TiB_2 等。由于价格都比较昂贵,实际生产上也很少使用(因相应 PTC 材料的导电性和 PTC 性能均十分出色而在研究工作中颇受重视)。综合填料的价格、稳定性和电学性能等多种因素,导电炭黑是目前比较理想的一种导电填料,也是研究和生产中采用最多的,市场上供应的高分子 PTC 材料大多也都是以炭黑为导电填料的。

(五) 导电涂料

导电涂料也被称为黑膜,产生于 20 世纪 50 年代末,在被喷涂于绝缘材料表面后可以作为电热元件使用。导电涂料本身的用途很多,而作为电热元件的应用较少。它的优点是面状加热、散热面积大、抗震性能好;缺点是发热层易脱落,且只适用于 200°C 以下加热。

导电涂料是伴随现代科学技术而迅速发展起来的特种功能涂料,至今约有半个世纪的发展历史。1948 年,美国公布了将银和环氧树脂制成导电胶的专利,这是最早公开的导电涂料。我国也在 20 世纪 50 年代开始研究和应用导电涂料。近几十年来,导电涂料已在电子、电器、航空、化工、印刷等多种军、民用工业领域中得到应用。与此相应,导电涂料的理论研究也得到迅速发展,并促进了应用技术的日益成熟与完善。

导电涂料一般由树脂、导电填料、助剂和溶剂组成。导电填料是导电涂料的重要组成部分,常用的导电填料主要有碳系填料、金属系填料、金属氧化物系填料和复合系填料。碳系填料有炭黑、石墨等,其缺点是色彩单调且颜色较深,无法制备浅色导电涂料;金属系填料(如金、铜、镍等)易于氧化生成不导电的金属氧化物,导电性能不稳定,容易

沉降,耐腐蚀性能差,其应用受到限制;复合系导电填料是以价廉、质轻的材料(如玻璃、石墨等)作为基底或芯材,在其表面包覆一层或几层化学稳定性好、耐腐蚀性强、电导率高的导电物质(如金、镍等)而得到的复合材料。目前,国内外导电涂料研究开发的重点是开发高导电性、低成本的导电填料。

国外对导电涂料的研究和应用比较早。日本在 1957 年开始开发和生产各种类型的导电涂料,其中镍系防静电涂料和铜系防静电涂料具有较好的效果。在国际上发展较快的还有美国的 Acme chemicals & Insulating,英国的 RDF ShieldingLT(RFS),日本的昭和电工等涂料公司,这些公司主要采用有机高分子聚合物和硅酸盐等作为黏结剂,所制得的涂料也称为电发热漆,其原理主要是利用电发热漆的导电性能,在通电状况下将电能转化为热能,但是存在易老化、脱落等问题。1989 年,德国赫彻斯特股份公司的京特·凯姆博先生研究出了一种复合导电涂料,可用于电子学及电工学方面,并获得了专利;1997 年,德国拜尔公司研制了一种抗划伤导电涂料,并申请了专利。我国的导电涂料也在 20 世纪 50 年代开始兴起,不少单位和研究者都进行了研究和应用。目前,国内电热涂料的研究主要集中在贵重金属填料方面,因原料成本较高和其他性能不足等一系列问题,其在实际应用方面受到制约。碳系导电涂料无毒无害及其优良的性能已经引起人们的高度重视,2004 年,湖南大学材料科学与工程学院的夏金童教授和涂川俊老师对复合型碳系导电涂料进行了新的研究,制备出的导电发热涂料具有优良的导电发热性能,并申请了专利。

随着导电涂料的研究和开发的不断深入,导电涂料在各行各业中的应用也日益广泛,尤其在电磁波屏蔽、电热和电采暖领域。而从目前导电涂料的发展动向来看,导电涂料正向着高效低耗、环保节能、成本低廉的方向发展。

(六) 电热膜

电热膜是近年来新兴的一种电热元件,它是吸取了 PTC 和导电涂料两种电热元件的特点制造而成的。近几年,电热膜作为加热元件的产品不断问世。其实,电热膜技术的开发应用已经有很长时间了,只是由于其进入民用领域比较晚,加上我国对电热膜技术的开发应用也比较晚,所以人们对电热膜及其产品才显得比较陌生。电热膜加热属于电阻加热

方法,这种加热技术的构想是国外在 20 世纪 50 年代初提出并开始研究的,当时一些工业发达国家提出了采用薄膜型电加热材料对石油输油管道、电线电缆等野外设施进行保温防冻。50 年代末,美国俄亥俄州的布列斯克加热用品公司在原来生产柔软加热带材的基础上发展了一种恒定功率的加热技术。这个发展对电热膜技术向实际应用提供了一个可行的方案。60 年代初,美国瑞侃公司开发了一种加热电缆,该产品采用一种半导电塑料,其电阻能随温度做非线性变化,并且有正温度系数特性(PTC 特性),从而自动调整热输出功率,以达到控温和保温的目的,这可以说是电热膜应用的最初产品。

我国电热膜研制始于 20 世纪 70 年代,上海有机氟研究所等单位均研制过电热膜,但未得到应用和推广。1984 年以后,许多单位开始电热膜的研制工作,取得不少成果,并进行了试制和技术转让。1986 年后,许多应用电热膜技术的产品陆续问世,在家用电器中有电热咖啡壶、搪瓷烧锅、直热式淋浴器、电热屏、电热板等;在工业方面的应用也逐渐推广,如用于信息终端大屏幕显示、飞机座舱导光板、复印机消电灯、输油管道的保温加热、电热电缆、设备的防冻霜等方面。

电热膜制热原理是产品在电场的作用下,发热体中的碳分子团产生布朗运动,碳分子之间发生剧烈的摩擦和撞击,产生的热能以远红外辐射和对流的形式对外传递,其电能与热能的转换率高达 98% 以上。碳分子的作用使系统表面迅速升温。将电热膜采暖系统安装在墙(地)面上,热能就会源源不断地均匀传递到房间的每一个角落。电热膜之所以能够对空间起到迅速升温的作用,就在于其 100% 的电能输入被有效地转换成了超过 66% 的远红外辐射能和 33% 的对流热能。

电热膜是面状件,它主要由导电物质和成膜材料组成,不同的导电物质和成膜基体可以形成许多种电热膜。其加工方法,有的是将膜直接制备在被加热载体上,在载体上形成的薄膜不能和载体分离,例如将导电物质和成膜物质混合成浆料后,涂覆在需加热物体上,进行干燥成膜、热解喷涂成膜等;有的是将电热膜元件化,例如将导电物质和成膜物质混合后挤压成型;也有的采用物理气相沉积、真空喷涂、离子喷涂、溅射等方法,使导电物与膜状基片组成一体,或将电热膜浆料制成转印纸等。与传统的镍铬丝电热元件相比,电热膜的特点是热分布均匀。电热膜可与被加热体制成一体,故接触面积大,传热热阻小,导热好,通电加热时,热量能迅速传给被加热体,而电热膜本身温度并不太

高,无发红灼热现象。

电热膜目前主要应用在室内取暖和环境温度保持等方面,如建筑物取暖、育雏室保温等。电热膜的优点是无明火加热、面状加热、热阻少、导热快、使用寿命长,且易于切割和分离,特别是电热膜的电能转换效率高达90%、热能损失小。

由于电热膜加热技术与其他导电发热材料相比,具有较为明显的优点,如热效率高、节能省电、寿命长、外型可选择性强、适用范围广、加工工艺简单、结构简单、成本低、无明火、安全可靠等,所以许多国家对电热膜加热技术及其应用都非常重视,一些发达国家在此方面的研究工作从未间断过。世界各大公司之间的竞争十分激烈,产品应用也十分广泛。如日本不断地开发电热膜新材料、新工艺,使电热产品逐步系列化,产品质量得到不断的提高,产品的产销量也稳步上升。日本鲁斯托化学公司对电热膜的200多种潜在用途做了鉴定,并进一步开拓了电热膜在便桶垫圈、人工假肢、地毯等方面的特殊用途。日本在1986年到1990年5年间被批准的有关电热膜及其相关技术的专利就有240项。日本松下电器公司开发了以聚烯烃、尼龙等为主体的电热膜,它利用结晶性高分子树脂晶体受热熔融时的体积膨胀特性,使导电复合材料具有实现电流控制的功能,从而使器材的发热更趋合理化和理想化。日本大金公司结合氟树脂产品的开发研制成功了聚四氯乙烯电热膜,主要应用在电热地毯、保温器具等家用电器产品上。美国北方电器公司生产的电热膜电热毯,年产量达400万条。美国雷顿公司研制生产的电热电缆,年产量达6万公里。英国Salton公司生产的各种无机类电热膜玻璃保温器具,因其技术先进而成为高附加值产品进入国际市场。

二、高蠕变强度高温合金电热丝技术研究

(一) 引言

目前生产的高效节能电加热器使用的发热元件电加热丝主要是进口的镍铬合金电热丝及镍铬铁合金电热丝。以电热丝为发热元件的加热器产品的具体技术要求是:加热器在无风状态、额定电压下,通电5分钟后,加热器的电热丝在某一方向的伸长量不大于5mm;加热器在有风状态、额定电压下,通电后,加热器应无肉眼可辨变形。国外进口的电加

热丝在“通—断电”循环5万次的情况下，仍然可以满足产品的要求。而国产电加热丝在“通—断电”循环500次时就会发生蠕变，甚至断裂，从而就存在带电的电加热丝和金属结构件接触而引起的安全隐患。为了满足技术要求只能使用进口的电加热丝来生产。发热元件在产品制造中如果要选用国产的电加热丝，就必须每隔一定的距离增放电热丝支撑架。为了提高国产原材料的配套能力，同时降低生产成本，而且不增加电热丝支撑架，就要求国产电热丝和进口电加热丝一样在高温下具有高的强度和低的变形量。如果不提升电热丝的性能，对电热丝不进行工艺处理的话，很难实现这样的目标。

为了充分发挥电热丝材料的潜力，降低生产成本，满足高效节能加热器中有关“变形”条款规定的要求，系统研究热处理工艺参数对镍铬合金电热丝组织与性能的影响至关重要。

（二）目前电热丝国内外研究现状

镍铬合金(Ni80Cr20)电热丝属于镍基高温合金。高温合金的性能主要取决于它的化学组成和组织结构。当合金成分一定时，影响合金组织的因素有铸造、变形和热处理，其中热处理的工艺参数，即加热温度、保温时间和冷却速度等对合金的晶粒度，沉淀相形状、尺寸等甚至晶界状态都有影响。

目前，高温合金强化的基本特点是：

- （1）提高位错在滑移面运动的阻力，即增加滑移时变形过程的形变抗力；
- （2）减少位错的扩散型运动过程，以抑制扩散型形变过程的进行；
- （3）改善晶界结构状态，以增加晶界强化作用，或取消晶界，以消除晶界在高温时的薄弱环节。

从上述三个基本特点出发，镍基高温合金中常采用的强化手段有固溶强化、第二相强化和晶界强化。

电热丝材料经过塑性变形成型后，要进一步提高其性能只有通过热处理。高温合金通过热处理来提高性能的方法通常是进行固溶、时效处理。然而不同成分的电热丝，其处理的工艺参数也是不同的，换句话说，根据使用要求，每一种电热丝都会有其最佳的固溶、时效处理工艺参数。

固溶处理即将合金加热到一定温度(固溶温度)进行保温，使第二相