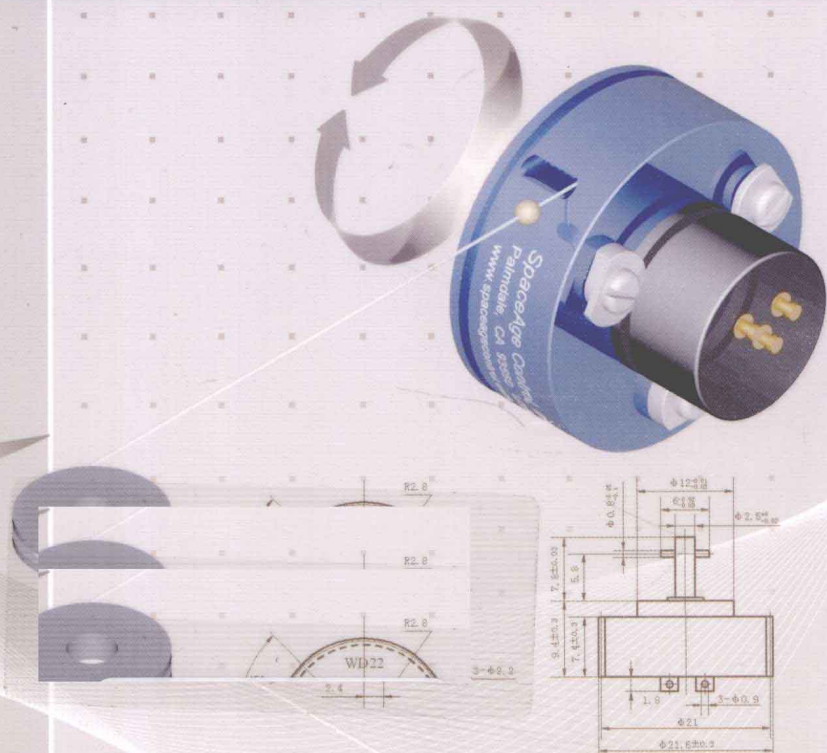


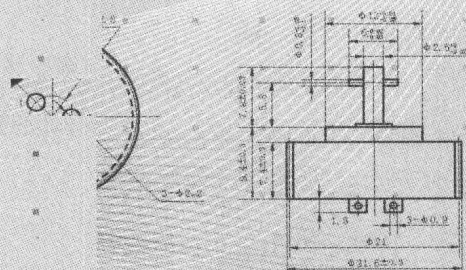
Researching of the Conductive Plastic Displacement Sensor Principle and Manufacturing Technology

<http://www.phei.com.cn>



電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

Researching of the Conductive Plastic Displacement Sensor Principle and Manufacturing Technology



北京·BEIJING

内 容 简 介

本专著是作者通过对这几年的研究成果进行整理归纳和总结所得。全书共分5章,第1章主要论述用于位移传感器敏感材料的导电塑料性能、配方及制备工艺,尤其是配方的深入研究取得了较大的突破,形成了一个创新性的、从基础研究到应用研究的较为系统、完整的学术体系。第2、3、4章主要阐述位移传感器的原理、关键零件的结构和工艺材料等内容,包括一个发明专利和一个实用新型专利。第5章论述了这种传感器性能参数的测试方法。本专著的内容还包括一些来自国外导电塑料功能材料的相关研究,体现了一定的学科前沿性。

本书对从事位移传感器研究和生产的工程技术人员具有一定的指导意义,可作为检测技术、电子信息技术及自动控制技术等专业在校大学生的拓展学习资料,也可作为传感器制造行业工程技术人员的参考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

导电塑料位移传感器原理与制造工艺研究/俞志根著. —北京:电子工业出版社,2011.5
ISBN 978-7-121-13395-4

I. ①导… II. ①俞… III. ①导电塑料-位移计-研究 IV. ①TM243

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第074930号

责任编辑:张 榕

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

开 本:720×1000 1/16 印张:12 字数:170千字

印 次:2011年6月第1次印刷

定 价:58.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序

导电塑料自从 20 世纪 70 年代被发现以来, 由于它的优异性能, 使其在电子信息领域的应用越来越广泛。近年来我国在导电塑料材料配方及制备工艺方面的研究也取得了较大的进展, 但与发达国家相比还存在一定的差距, 也无有关的研究专著, 只有相关的一些研究论文和较多的专利报道, 尤其是作为传感器敏感材料的导电塑料还是以进口为主, 关键技术受制于人。本专著在研究导电塑料导电机理的基础上, 针对传感器敏感材料的性能特点, 研究了各种可靠的导电塑料配方, 通过实验研究寻找最合理可行的制备工艺, 以期获得性能卓越的传感器敏感材料, 并根据导电塑料的特性, 结合位移传感器的基本原理, 深入研究适合导电塑料材质的创新型位移传感器结构和制造工艺及性能测试方法, 获得了较为可靠实用的制造工艺。因此, 本专著在传感器及其敏感材料研究领域具有一定的学术价值, 尤其是对位移传感器的生产具有一定的指导意义, 较有实际应用价值, 对进一步推动我国新型导电塑料材料的应用有一定的作用。

本专著主要内容来自作者所从事的科研课题“高精度导电塑料位移传感器的研制”, 通过对这几年的研究成果进行整理归纳和总结所得。全书共分 5 章, 第 1 章主要论述用于位移传感器敏感材料的导电塑料性能、配方及制备工艺, 尤其是配方的深入研究取得了较大的突破, 形成了一个创新性的、从基础研究到应用研究的较为系统、完整的学术体系, 对作为传感器敏感材料的导电塑料研究领域较具应用价值。第 2、3 和 4 章主要阐述了位移传感器的新型原理、关键零件的结构和工艺材料等内容, 具有一定的创新研究, 取得

一些有应用价值的研究成果。第5章论述了这种传感器的测试方法及其工艺规程。本专著的内容还包括一些来自国外导电塑料功能材料的相关研究，体现了一定的学科前瞻性。

本专著结构合理、层次分明、思路清晰。全书主要包括两大部分内容：一是导电塑料导电原理分析和配方及制备工艺研究；二是位移传感器新型结构及工艺研究。本专著突出学术研究的学术性和应用性并重这一思想。专著中所有研究均建立在企业实际应用需要这一基础之上，通过一系列实验研究来解决企业生产过程中遇到的问题，重在突出其实用价值。本专著结构新颖，写作用语简洁明了、通俗易懂，化深奥学术用语为易于被常人接受的日常语言，十分便于企业工程技术人员和学生自学。因此，本专著具有较高的出版价值，相信它的出版能进一步推动传感器敏感材料的发展，提升我国位移传感器的性能和品质。

本专著对从事位移传感器研究和生产的工程技术人员具有一定的指导意义，一方面可作为检测技术、电子信息技术及自动控制技术等专业在校大学生的拓展学习资料；另一方面，也可作为传感器制造行业工程技术人员的参考资料。

目 录

第 1 章 导电塑料	1
1.1 导电塑料的导电机理	3
1.1.1 导电通路形成理论	4
1.1.2 室温导电机理	6
1.2 导电塑料的特殊效应	9
1.2.1 压敏效应和拉敏效应	9
1.2.2 热敏效应	10
1.2.3 电压开关效应	12
1.3 导电塑料的类型	13
1.3.1 复合型导电塑料的用途	14
1.3.2 复合型导电塑料的类型	14
1.3.3 影响复合型导电塑料导电性能的主要因素	18
1.4 导电塑料的制备工艺	19
1.4.1 母料的制备	20
1.4.2 导电塑料制品的成型工艺方法	25
1.5 导电塑料的应用	32
1.5.1 用于位移传感器敏感电阻的导电塑料	32
1.5.2 用于电磁屏蔽材料	34
1.5.3 用于便携电源及太阳能电池	34
1.5.4 用于集成电路芯片材料	35

1.5.5	用于新型显示材料	36
1.5.6	用于新型纳米材料	36
1.5.7	用于新型人造肌肉和人造神经材料	37
1.6	导电塑料发展展望	37
1.6.1	新型导电添加剂的工业化开发与应用	38
1.6.2	特殊功能导电塑料的开发	42
1.6.3	本征导电与离子导电型塑料合金	45
第2章	位移传感器	49
2.1	位移传感器简介	49
2.2	模拟式位移传感器	50
2.2.1	电位器式位移传感器	50
2.2.2	电感式位移传感器	54
2.2.3	电涡流式位移传感器	62
2.2.4	电容式位移传感器	66
2.3	数字式位移传感器	71
2.3.1	光栅位移传感器	71
2.3.2	磁栅位移传感器	77
2.3.3	容栅位移传感器	83
2.3.4	感应同步器	87
第3章	导电塑料位移传感器的结构原理及性能特点	98
3.1	导电塑料位移传感器工作原理	98
3.2	导电塑料角位移传感器的结构组成研究	99
3.2.1	角位移传感器总体结构	100
3.2.2	传感器电阻体的结构分析	104
3.2.3	电刷组件结构分析	106

3.2.4	外壳的结构组成	110
3.3	线位移传感器的结构原理	112
3.4	传感器的主要性能参数	115
3.4.1	传感器输出线性度	116
3.4.2	输出平滑性	116
3.4.3	降功耗曲线	117
3.4.4	迟滞及重复性	118
3.4.5	灵敏度与分辨率	120
3.4.6	稳定性及漂移	121
3.4.7	精确度	121
第4章	导电塑料位移传感器制造工艺研究	123
4.1	简介	123
4.1.1	导电塑料的导电机理	124
4.1.2	影响导电塑料导电性能的因素	125
4.2	传感器敏感电阻的喷涂法生产工艺	127
4.2.1	电阻绝缘基体的热塑成型	128
4.2.2	配制导电喷涂液	128
4.2.3	喷涂脱模剂	128
4.2.4	喷涂导电塑料电阻液	129
4.2.5	喷涂引出电极焊接区用银浆料	130
4.2.6	喷涂工艺参数对导电塑料电阻膜性能的影响	130
4.3	传感器敏感电阻的印刷法生产工艺	132
4.3.1	导电塑料电阻体印刷工艺研究	132
4.3.2	丝网印刷设备	134
4.3.3	手工丝网印刷工艺过程	135

4.3.4	自动丝网印刷工艺	138
4.4	电阻体的修刻工艺	139
4.4.1	传感器电阻体修刻技术现状及发展趋势	139
4.4.2	精密电阻体修刻原理	140
4.4.3	电阻体的修刻方式	144
4.5	其他零件的生产制造工艺	147
4.5.1	电刷的生产工艺	147
4.5.2	接线柱制造工艺	147
4.5.3	转轴(支架及测量杆)制造工艺	147
4.5.4	外壳制造工艺	148
4.6	传感器装配工艺	148
4.6.1	零件清洗	148
4.6.2	驱动机构的装配	149
4.6.3	底座的装配	149
4.6.4	总装与密封	150
第5章	导电塑料位移传感器性能测试方法研究	151
5.1	电气性能参数测试	151
5.1.1	传感器初始电阻及其误差	151
5.1.2	电阻温度系数	152
5.1.3	绝缘电阻与耐压等级	153
5.1.4	接触电阻	154
5.1.5	噪声与等效噪声电阻	155
5.2	机械性能参数测试	157
5.2.1	起动力和力矩	158
5.2.2	锁紧力矩	158

5.2.3	轴向推力和拉力	159
5.2.4	止挡力和力矩	159
5.2.5	机械寿命	160
5.2.6	机械跳动	161
5.2.7	轴的间隙	162
5.3	输出特性参数测试	162
5.3.1	测量范围	163
5.3.2	灵敏度	163
5.3.3	输出平滑性	164
5.3.4	输出线性度	165
5.3.5	分辨力	170
5.4	负载特性参数测试	171
5.4.1	负载特性	171
5.4.2	负载误差	172
5.5	额定功耗测试	173
5.5.1	减功耗温度曲线	173
5.5.2	额定电压与额定电流	175
5.5.3	最高工作电压	175
参考文献		177

第1章

导电塑料

材料根据其导电能力的不同分成导体、半导体和绝缘体三大类，图 1.1 所示表示用表面电阻率来区分不同材料的导电性能，可将材料分为抗静电材料（绝缘体）、防静电材料（半导体）和电磁/无线电干扰（EMI/RFI）屏蔽材料（导体），电阻率越低，则其导电性越强。

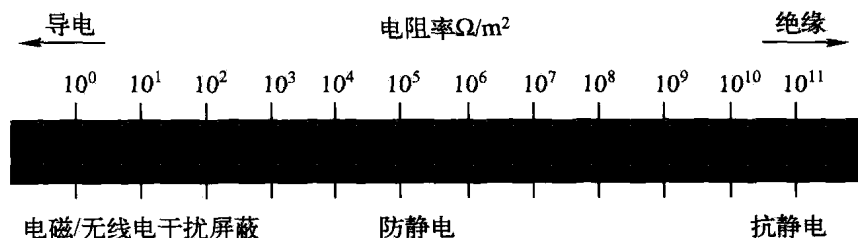


图 1.1 材料的导电图谱

塑料历来被认为是良好的绝缘材料，其电阻率都在 $10^{11}\Omega/\text{m}^2$ 以上。但是，自从 20 世纪 70 年代日本东京工业大学研究所的实验室负责人，化学家白川英树在用乙炔气体制造一种聚乙炔塑料时，因偶然加入了比实际要

求量多了 1000 倍的催化剂，结果得到了一种具有良好导电性能的银白色薄膜——含碘聚乙烯，这一偶然的科学发现具有划时代意义，它开创了导电材料的新纪元，完全改变了人们对塑料的认识。后来，美国宾夕法尼亚大学教授、化学家艾伦·麦克迪尔米德和艾伦·黑格对此进行了深入研究，逐步弄清了塑料导电的内在机理，由此兴起了一股导电聚合物即导电塑料的研究热潮。

自从导电塑料这种特殊的材料被偶然发现以来，随着研究的不断深入，其应用也越来越广泛。首先，它被作为一种良好的电磁屏蔽材料使用。由于普通塑料固有的电绝缘性使其易于积累静电荷，形成较高的静电压。所以，用塑料制成的微电子器件外壳容易造成灰尘及其他污物吸附、产生静电放电（ESD）与电击现象。这使得一些对静电敏感的产品（如微电子元件、集成电路、轻质油品、火药等）生产和使用中由于应用了塑料，受静电的危害越来越突出。另外，微电子工业的高速发展，产生了大量的电磁波干扰（EMI）和射频干扰（RFI），越来越小型化、轻量化、数字化、高密度集成化及灵敏度越来越高的现代电子元器件很容易受到这种复杂电磁环境的影响，甚至发生误动作、出现图像障碍及声音障碍等。因此，静电放电的电磁效应、微电子设备相互间电磁干扰（EMI）及电磁兼容性（EMC）问题，也越来越受到重视。因此，对许多应用场合中的塑料制品，不仅要求其有良好的综合性能，而且要求其有一定的导电性能，以提供良好的防静电性（或静电耗散性）或 EMI/RFI 屏蔽性能。例如用做集成电路、芯片、传感器护套等精密电子元器件生产过程中使用的防静电周转箱、托盘、芯片载体、薄膜袋等，均可用导电塑料制作。

其次，随着研究的进一步深入，现已成功合成出了性能类似于硅的半导体导电塑料，这类导电塑料可替代单晶硅用于微芯片的开发，相信在不远的将来，塑料芯片完全有可能取代硅芯片。因为，塑料芯片的价格仅为硅芯片

的1%到10%，极具市场竞争力。目前，日本和美国等发达国家已研制出集成了几百个电子元器件的塑料芯片，离实际应用已经不远。根据测算，采用这种导电塑料制造的新款芯片可以大大缩小计算机的体积，提高计算机的运算速度。

再次，20世纪80年代开发成功了导体型导电塑料，主要用于集成电路的膜电阻和传感器用敏感电阻材料。日本和美国在20世纪90年代就开始将导电塑料用在精密位移传感器中作为敏感材料，将其制成平面电阻膜，利用电刷臂将转角位移转换成电阻的变化，使原电阻位移传感器的结构更加小巧，输出精度大大提高，且具备极强的抗噪声能力和超长的机械寿命，被广泛应用于雷达、导弹、火炮等武器装备中，并已经拓展到家用电器、石油化工、机械制造、工业自动化等诸多民用领域。国内导电塑料的开发与应用也已从初期的纯实验室研究发展到了工业化应用阶段。

总之，随着导电塑料性能的不断改善，尤其是欧盟CE认证指令与新的电磁兼容指令的实施，都有力地促进了导电塑料的工业化应用和发展。近年来，全球导电塑料需求不断增长。据欧洲商业通信公司最新研究报告显示，2006年全球导电塑料消费量比2005年增长了10%，从7万吨增加到7.75万吨。在需求增长的同时，用于导电塑料制造的新型导电添加剂、母料技术、本征导电及离子导电塑料合金技术等，都取得了重要的工业进展，获得了商业化应用，也使以往在导电塑料制造方面遇到的一些难题得到了解决。

1.1 导电塑料的导电机理

导电塑料导电机理的研究主要有两个方面：一是导电通路的形成机理；

二是导电通路形成后的室温导电机理。其中,前者主要研究导电塑料内的导电功能体如何通过相互接触形成一条完整的导电通路;后者则主要研究导电通路形成后,所产生的“载流子”的微观迁移过程及其迁移规律。

导电高分子复合材料的导电机理比较复杂。许多实验表明,尽管采用不同的制备方法、选取不同的基体材料和功能体,导电高分子复合材料却表现出一种相似的性质,即“渗滤阈值”现象。随着导电功能体含量的增加,开始时体系的电导率增加极少。当导电功能体达到某一临界含量(阈值)时,复合体系的电导率将会急剧增加(有时可达近10个数量级)。在导电功能体的临界含量附近体系电阻率的急剧下降,一般认为是由于导电功能体形成大量导电通路引起的。因此,导电通路如何形成及导电功能体的临界填充率与复合体系电阻率之间的关系便成为导电高分子复合材料研究中首先关心的问题。许多学者提出了各种理论来解释各自的实验结果,其理论大致可分为下面几类模型。

1.1.1 导电通路形成理论

诸多实验结果表明,不同制备方法,不同聚合物基体及导电功能体组成的复合材料,都表现出“渗滤”现象,即当导电功能体的含量增加到某一临界值时,复合材料的电阻率急剧下降。这一现象通常被认为是由导电功能体形成大量导电通路而引起的。为解释这些实验结果,学术界提出了许多理论模型,这些模型大致可以分为如下四种。

1. 统计渗滤模型

统计渗滤模型大部分为几何模型,即将基体材料或填充材料抽象为具有某种形状分散体系,然后基体材料和填充材料按某种机理复合为整体,而

且基体成为连续相, 导电填充材料成为不同程度的连续相或分散相, 并由此形成部分导电通道和导电隧道。在此基础上, 寻找复合材料的电阻率与导电功能体含量之间的关系。典型的例子是将基体抽象为尺度和形状不同的球、立方体、长方体等, 而将导电功能体抽象为球、椭球、线状珠串、葡萄状珠串等。这种模型对于二元复合体系通常是有效的, 但是, 对于多元体系(基体材料或填充材料不止一种), 尽管能得出相应的模型, 但在估计得出的理论值与实验值之间的误差较大。

2. 热力学模型

统计渗滤模型虽然可以大致解释复合体系电阻率的变化趋势, 但由于过分突出导电功能体的空间几何特征, 几乎没有考虑基体与导电功能体之间的相互作用, 也没有考虑界面效应的影响, 其理论预期值与许多实验结果不符, 对许多实验现象也无法解释。对比热力学模型做了相应的改进。

界面自由能热力学模型基于平衡热力学原理, 认为形成导电通道时的导电功能体的临界体积分数 V_c 与体系的总界面自由能过剩有关。当总界面自由能过剩超过一个与高分子种类无关的普适参数 Δg 时, 导电通道开始形成; 另外, 在实际加工成型过程中各种因素的作用将造成两相界面状况的不断变化, 而且高分子基体的熔融黏度越大, 功能体粒子的尺寸越小, 则分别对“平衡”相分离过程的抑制和促进作用越大。在此基础上得出的理论模型, 临界体积分数 V_c 的估计与许多导电高分子复合材料的实验值符合得较好。但界面自由能热力学模型目前只适用于非极性聚合物基体。

动态界面模型基于非平衡热力学原理, 而且说明了导电通道形成的微观过程。该模型假定每个功能体粒子表面都吸附有高分子薄层, 其厚度(约 15 ~ 20nm) 由高分子种类决定, 不受功能体表面结构的影响, 而且在加工过程中不会被破坏; 在功能体含量较低时, 功能体粒子的分布不均匀, 既有单个粒

子也有聚集体存在，它们分别被高分子薄层（吸附层）包裹；随着功能体含量增大至某一定值时，填入聚集体中的粒子间的压缩力将破坏部分粒子吸附层，粒子可相互移动至电接触而成为“絮凝态”，并表现为“层”状结构，其后逐渐发展成为三维导电网络。动态界面模型对复合体系临界体积分数 V_c 的理论估计值也与许多实验结果吻合较好。不足之处是，该模型中某些参数尚无明确的物理意义。

3. 微结构模型

微结构模型的建立试图达到两个目的：一是描述各种不同结构复合材料的导电性；二是通过对材料结构的研究手段来设计聚合物基体导电复合材料。然而，尽管有一些简单的微结构模型，但并不具备普遍性。

以上三种模型，虽然从不同角度描述了导电复合材料导电通道的形成理论，但均有一定的局限性，且未有一种理论能很好地解释填充型导电复合材料的导电性能。

1.1.2 室温导电机理

导电塑料的室温导电理论主要有通道导电理论、隧道效应理论和电场发射理论三种，下面分别进行介绍。

1. 通道导电理论

当导电功能体为微粒时，导电微粒相互接触形成网络通道而导电即为通道导电理论。该理论将导电微粒看做彼此独立的颗粒，并规则、均匀地分布于聚合物基体中。当导电微粒直接接触或导电微粒间的间隙很小（ $< 1\text{nm}$ ）时，在外电场作用下即可形成通道电流。通道导电理论虽然可以解释一些导

电高分子复合材料的渗滤现象,但是,对 TEM 和 SEM 的观察结果都表明,复合材料中的导电微粒分布并不完全与通道理论的假设条件相符:(1)聚合物基体中的单个导电微粒在一般情况下并不彼此独立(粒径特别大的颗粒除外),许多微粒以聚集体形式存在,聚集体的大小、取向受微粒性质(物理和化学性质,特别是表面性质)和基体性质的影响;(2)由于聚集体的存在,单个微粒分布的均匀性难以维持,单从聚集体方面考虑,其分布也是不规则的;(3)除部分微粒直接接触或以聚集体形式直接接触外,更多的导电微粒间的间隙较大,尚未形成接触状态;甚至对于没有形成接触状导电链的情形,只要导电微粒间的间隙较小(10nm 左右)也会产生导电现象。这些都是通道理论难以解释的。

2. 隧道效应理论

当导电功能体为微粒且填充率很高时,微粒之间直接接触形成导电网络的几率也大,用通道导电理论来解释通常是有效的。一般地,部分导电微粒相互接触而形成链状导电网络,另一部分微粒则以孤立粒子或小聚集体形式分布于绝缘的聚合物基体中,基本上不参与导电(若导电微粒的填充率很低,则完全取后一种情形)。然而,如果孤立粒子或小聚集体之间相距很近,只被很薄的聚合物薄层(10nm 左右)隔开,由热振动激活的电子就能越过聚合物薄层所形成的势垒跃迁到邻近导电微粒上形成隧道电流,此即量子力学中的隧道效应。隧道效应理论与一些导电高分子复合材料的实验曲线符合较好。其后的许多实验结果也是隧道效应理论的有力证据。

3. 电场发射理论

电场发射理论认为聚合物基导电复合材料导电机理除通道导电外,另