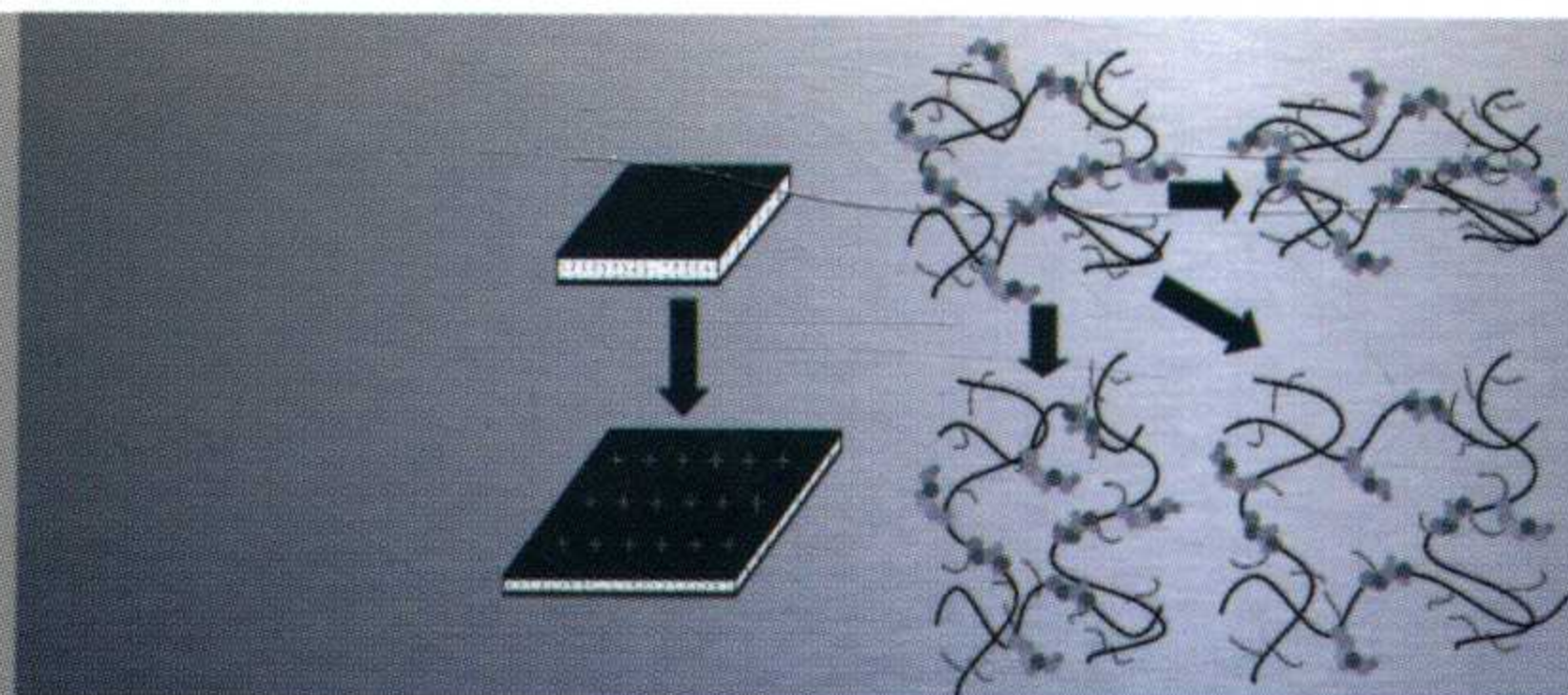




材料科学技术著作丛书

介电弹性体智能材料 力电耦合性能及其应用

陈花玲 周进雄 著



科学出版社

材料科学技术著作丛书

介电弹性体智能材料 力电耦合性能及其应用

陈花玲 周进雄 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者所在科研团队近十年来从事“介电弹性体(dielectric elastomer, DE)智能材料力电耦合性能及其应用”的科研工作总结。书中内容以本科研团队的相关研究成果为主线,同时梳理了1990年至今本领域国内外的代表性工作,对介电弹性柔性材料的基本性能、力电耦合理论模型以及影响其力电响应特性的主要因素进行了详细介绍,并介绍了该智能材料的应用研究案例,从而为读者正确认识该类材料、设计及应用该新型智能材料提供借鉴。

本书既可以作为高等院校高年级本科、研究生教学的辅助教材,也可以作为研究单位、相关企业了解DE智能材料的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

介电弹性体智能材料力电耦合性能及其应用/陈花玲,周进雄著. —北京:科学出版社,2017.6

(材料科学技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-053004-2

I. ①介… II. ①陈…②周… III. ①智能材料-耦合-研究 IV. ①TB381

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第117359号

责任编辑:牛宇锋 罗娟 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年6月第一次印刷 印张:21

字数:408 000

定价:120.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《材料科学技术著作丛书》编委会

顾 问 师昌绪 严东生 李恒德 柯 俊
颜鸣皋 肖纪美

名誉主编 师昌绪

主 编 黄伯云

编 委 (按姓氏笔画排序)

干 勇	才鸿年	王占国	卢 柯
白春礼	朱道本	江东亮	李元元
李光宪	张 泽	陈立泉	欧阳世翕
范守善	罗宏杰	周 玉	周 廉
施尔畏	徐 坚	高瑞平	屠海令
韩雅芳	黎懋明	戴国强	魏炳波

前言

电活性聚合物(electroactive polymer, EAP)是近年来发展起来的一类新型柔性智能材料,是软物质领域的重要研究内容之一。由于具有应变大、柔韧性好、质量轻等独特性质, EAP 在航天航空、仿生机械、生物医学等多个领域极具应用前景。以潜在技术的市场分析研究著称的 IDTechEx 公司在其分析报告 *Electroactive Polymers and Devices 2013-2018: Forecasts, Technologies, Players* 中指出 EAP 是最有未来潜力的技术之一,并预测到 2018 年,与 EAP 相关的产品市场将达到 22.5 亿美元,尤其是在驱动器领域,与医疗设备和仿生机器人等相关的研究将成为重点发展领域。

EAP 材料主要包括电场型和离子型两大类型。电场型 EAP 的典型代表材料是介电弹性体(dielectric elastomer, DE)材料,它包括聚丙烯酸酯、硅橡胶、PDMS 等。相比于其他 EAP 材料, DE 材料独有的特点是弹性模量低、变形大,在其上下表面涂上柔性电极后,电激励可产生 100% 的应变,在机械力的联合作用下甚至可以达到 2200% 的面积应变。这种变形尺度大大超过了一般压电材料和形状记忆材料的变形尺度,因此,在一些需要大变形的场合具有巨大的应用潜力。此外,它的机电转换效率最大可达 90%,频率响应范围可从 0.1 Hz 到 20 kHz。由于 DE 材料具有这种快速、大变形的特点,在某些特定的环境下使用具有独特的优势,可以作为微型驱动器应用于微小型机器人、生物医学领域等。自从这些优异特性在 2000 年由 *Science* 期刊报道之后,引起了国内外学者的广泛关注。不少学者围绕新型 DE 材料及器件的设计和制备、DE 材料力电耦合下的大变形机理等开展了大量研究,成果陆续发表于 *Science*、*Nature*、*Physical Review Letter*、*PNAS* 等高水平的期刊上,使 DE 材料研究迅速成为软物质科学最活跃的研究方向之一。基于 DE 材料这种高效的机电转化特性,新型的柔性器件和结构也得到了发展,如柔性机械驱动结构、可弯曲的柔性电子系统、高压绝缘储能器、软体机器人等。

总体来看, DE 材料的研究属于前沿学科及交叉学科的研究范畴,该领域目前仍属于一个并不成熟且正在积极探索的研究领域。但鉴于其具有巨大的学术价值和广阔的应用前景,本书对介电弹性柔性材料的基本性能、力电耦合理论模型、力电响应影响机制及其调控、驱动器和储能器设计等主要内容进行详细介绍,并介绍该智能材料的应用研究案例,其目的一是推动 DE 材料的实用化进程,二是为其他类型的电活性聚合物材料的研发提供借鉴。

全书由陈花玲教授与周进雄教授组织编写。陈花玲教授负责所有章节的编校

及全书的统稿工作,书中第1、2、4、9章主要由李博讲师编写,第3、6、7、8章主要由张军诗博士及盛俊杰博士共同编写,第5、12章主要由刘磊博士编写,第10、11章主要由周进雄教授和陈宝鸿博士编写,第13章主要由王永泉副教授及钟林成硕士和王垠博士编写,第14章主要由张弛博士编写。

在编写本书各章内容中,部分内容采纳了课题组其他博士和硕士研究生的实验结果。在课题研究过程中,也得到了西安交通大学李涤尘教授、贾书海教授的协助与帮助,作者在此一并表示感谢!

本书是作者所在科研团队近十年来从事“介电弹性体智能材料力电耦合性能及其应用”的科研工作总结,在研究过程中得到国家自然科学基金重大项目“结构/功能一体化精准制造技术研究(51290294)”,国家自然科学基金创新群体项目“轻质非均匀介质的力学行为(11321062)”,国家自然科学基金面上项目“介电弹性功能材料机电耦合失效机理及行为研究(10972174)”,“介电弹性体动态换能机理及能量收集系统设计方法研究(51375367)”,“介电弹性材料在力电耦合变形下的击穿破坏行为研究(11402184)”,“柔性离子液体凝胶驱动的介电弹性体高频振荡器力电耦合行为(11472210)”,“非均质高强水凝胶非均匀溶胀诱发失稳斑图调控的实验和数值模拟(11372239)”,教育部博士点基金项目“介电弹性材料的力电耦合非线性动力学行为研究(20120201110030)”等的资助,借此机会对这些资助表示感谢。此外,本书在编写过程中也参考了大量相关领域的书籍和资料,借此机会也对这些作者表示感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,恳请广大读者不吝赐教,给予指正。

作者

2017年4月10日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 介电弹性体材料及其基本特性	3
1.1.1 DE 材料聚合物薄膜	4
1.1.2 DE 材料的柔性电极	6
1.2 DE 材料的研究进展	8
1.2.1 新型 DE 材料研发的进展	8
1.2.2 DE 材料电致变形性能的研究进展	10
1.2.3 DE 材料变形机理的研究进展	13
1.2.4 DE 材料力电耦合理论研究进展	14
1.3 DE 材料的发展前景	16
参考文献	18
第 2 章 DE 材料电致变形力电耦合模型及稳定性	22
2.1 DE 材料力电耦合模型发展历程	22
2.2 基于热力学理论的 DE 材料电致变形力电耦合模型	24
2.2.1 基于 DE 材料的平面驱动器热力学模型	24
2.2.2 DE 材料应变能模型	27
2.3 DE 材料力电耦合变形的稳定性	29
2.3.1 DE 材料的失稳现象	29
2.3.2 DE 材料失稳机理	33
2.3.3 非线性极化对突跳失稳的影响	37
2.4 DE 材料力电耦合失稳现象的利用	42
2.4.1 突跳失稳的利用	42
2.4.2 凹坑失稳的利用	43
2.5 本章小结	45
参考文献	46
第 3 章 DE 材料的基本力电性能	49
3.1 DE 材料的力电性能实验方法概述	49
3.1.1 DE 材料介电性能测试的实验仪器及方法	49
3.1.2 DE 材料力学性能测试的实验仪器及方法	51

3.2 频率对 DE 材料力电特性的影响	53
3.2.1 频率对 DE 材料介电性能的影响	53
3.2.2 频率对 DE 材料力学性能的影响	56
3.3 温度对 DE 材料力电特性的影响	57
3.3.1 温度对 DE 材料介电性能的影响	57
3.3.2 温度对 DE 材料力学性能的影响	60
3.4 预拉伸对 DE 材料力电特性的影响	62
3.4.1 预拉伸对 DE 材料介电性能的影响	62
3.4.2 预拉伸对 DE 材料力学性能的影响	64
3.5 DE 材料的力电耦合效率	64
3.5.1 DE 材料的应变系数	64
3.5.2 DE 材料的机械效率	66
3.5.3 DE 材料的电效率	68
3.5.4 DE 材料的力电耦合效率	69
3.6 DE 材料的电荷泄漏性能	70
3.7 本章小结	76
参考文献	77
第 4 章 预拉伸对 DE 材料力电耦合特性影响的分析	80
4.1 预拉伸对固体电介质极化的影响	80
4.1.1 极化的微观机理和表达	80
4.1.2 极化内微观电场和宏观电场的关系	81
4.2 高分子聚合物材料的制约取向极化行为	84
4.2.1 制约取向极化现象	84
4.2.2 DE 材料制约取向极化数学模型	85
4.2.3 预拉伸对取向极化的影响	87
4.3 预拉伸对力电耦合变形和稳定性的影响	88
4.3.1 考虑制约取向极化的 DE 材料本构关系	88
4.3.2 预拉伸对电致变形与稳定性的影响	89
4.4 预拉伸对 DE 材料力学性能及力电耦合行为的影响	91
4.5 预拉伸的实现技术	93
4.5.1 机械预拉伸技术	93
4.5.2 双网络互穿聚合物的预拉伸技术	95
4.6 本章小结	96
参考文献	96

第 5 章 温度对 DE 材料力电耦合特性影响分析	98
5.1 温度对 DE 材料力电耦合特性的实验研究	98
5.1.1 实验平台及试件	98
5.1.2 DE 材料力电耦合特性实验结果	100
5.2 DE 材料热-力-电耦合理论模型	101
5.2.1 DE 材料的热-力-电的自由能模型	101
5.2.2 DE 材料热-力-电耦合本构方程	102
5.3 温度对 DE 材料力电耦合稳定性的影响	104
5.3.1 温度对力电失稳的影响	105
5.3.2 温度对失去张力失稳现象的影响	106
5.3.3 温度对电击穿失效的影响	107
5.3.4 温度对材料机械强度极限的影响	110
5.3.5 稳定性区域	110
5.4 温度及预拉伸对 DE 材料力电耦合性能的影响	112
5.4.1 温度及预拉伸变形对 DE 材料介电常数的影响	112
5.4.2 温度及预拉伸变形影响下的 DE 材料力电耦合特性	113
5.5 本章小结	117
参考文献	117
第 6 章 DE 材料的黏弹性及其对性能的影响分析	119
6.1 黏弹性 DE 的力电耦合模型	119
6.2 黏弹性对 DE 材料预拉伸作用的影响	123
6.2.1 黏弹性引起的 DE 材料松弛变形对预拉伸作用的影响	123
6.2.2 黏弹性对预拉伸后 DE 材料介电强度的影响	123
6.2.3 黏弹性对预拉伸后 DE 材料力电耦合失稳的影响	125
6.3 直流电压下 DE 材料的蠕变行为及其抑制方法	127
6.4 交流电压下的 DE 材料的蠕变行为及其抑制方法	130
6.4.1 控制方程的建立	130
6.4.2 数值计算结果和讨论	132
6.5 本章小结	137
参考文献	137
第 7 章 DE 材料的动态特性分析	139
7.1 DE 材料驱动器的动力学建模方法	139
7.1.1 基于虚功原理的 DE 材料驱动器建模方法	139
7.1.2 基于欧拉-拉格朗日方程的 DE 材料驱动器建模方法	141
7.2 DE 材料的非线性动态特性	144

7.2.1 DE 材料驱动器的固有频率分析	144
7.2.2 DE 材料驱动器的非线性动态响应特性分析	146
7.3 温度对 DE 材料驱动器动态特性的影响	154
7.4 频率对 DE 材料驱动器动态特性的影响	157
7.5 本章小结	160
参考文献	160
第 8 章 DE 材料电荷驱动及电荷泄漏的影响	162
8.1 电荷驱动下的 DE 材料驱动器	162
8.1.1 电荷驱动下 DE 材料的力电耦合模型	162
8.1.2 电荷驱动和电压驱动下 DE 材料的力电耦合行为比较	165
8.2 DE 材料的电荷泄漏特性	167
8.3 电荷泄漏对电荷驱动下 DE 材料性能的影响及补偿方法	170
8.3.1 电荷泄漏对 DE 材料性能的影响	170
8.3.2 面向稳定变形的电荷泄漏补偿方法	173
8.4 电荷泄漏对 DE 材料动态性能的影响	175
8.5 本章小结	180
参考文献	180
第 9 章 不同变形条件下 DE 材料的力电耦合特性	181
9.1 不同变形模式下 DE 材料的静态变形行为	181
9.1.1 DE 材料驱动器的不同变形模式	181
9.1.2 不同变形模式下的力电耦合分析模型	183
9.1.3 不同变形模式下力电耦合行为分析	186
9.2 不同力学边界下 DE 材料驱动器的动态特性	188
9.2.1 弹簧边界	189
9.2.2 阻挡力边界	192
9.2.3 双 DE 材料薄膜构成的边界	193
9.3 DE 材料的离面起皱现象	199
9.3.1 不规则的起皱现象	200
9.3.2 规则的褶皱现象	206
9.4 本章小结	210
参考文献	211
第 10 章 DE 材料驱动器力电耦合大变形有限元数值模拟及应用	213
10.1 引言	213
10.2 DE 材料力电耦合大变形分析理论	214
10.3 有限元离散及迭代求解	216

10.4	DE 材料本构关系	218
10.5	DE 材料力电耦合大变形数值模拟算例	219
10.6	本章小结	226
	参考文献	226
第 11 章	离子导体驱动 DE 的基本理论及其应用	228
11.1	引言	228
11.2	离子导体驱动 DE 的基本理论	230
11.2.1	离子导体驱动 DE 的工作原理	230
11.2.2	离子导体驱动 DE 热力学理论	232
11.3	离子导体性能及其对 DEA 的影响	235
11.3.1	离子导体的稳定性	235
11.3.2	离子导体对 DEA 力电耦合变形的影响	238
11.4	离子导体的应用	239
11.4.1	离子导体驱动的 DE 传感器和离子导线	239
11.4.2	离子导体驱动的柔性 DE 电致发光器件	241
11.5	本章小结	242
	参考文献	243
第 12 章	基于 DE 材料的驱动器结构设计	245
12.1	单层 DE 材料驱动器结构设计	245
12.1.1	单层 DE 材料面内变形驱动器	245
12.1.2	单层 DE 材料面外变形驱动器	251
12.2	多层堆栈式 DE 材料驱动器结构设计	253
12.2.1	多层 DE 材料堆栈式结构制备方法	254
12.2.2	多层 DE 材料堆栈式结构的应用	257
12.3	圆柱形 DE 材料驱动器结构设计	260
12.3.1	圆柱形 DE 材料直线驱动器	260
12.3.2	圆柱形 DE 材料弯曲驱动器	263
12.4	本章小结	268
	参考文献	269
第 13 章	基于 DE 材料的能量收集理论与实践	271
13.1	基于 DE 材料的能量收集工作原理	272
13.2	基于 DE 材料的能量收集系统在不同变形模式下的能量计算	277
13.3	基于 DE 材料的能量收集国内外研究进展	281
13.3.1	基于 DE 材料能量收集行为的理论研究进展	282
13.3.2	基于 DE 材料能量收集的结构设计研究	284
13.3.3	面向 DE 材料能量收集的电路研究	292

13.4	基于 DE 材料的能量收集实验	295
13.5	本章小结	300
	参考文献	301
第 14 章	基于 DE 材料的传感器结构设计	305
14.1	DE 材料的传感原理	305
14.2	平面形 DE 材料传感器	306
14.2.1	压力传感器	306
14.2.2	拉伸传感器	309
14.2.3	多功能传感器	311
14.3	筒形 DE 材料传感器	314
14.4	具有表面微结构的 DE 材料传感器	316
14.5	DE 材料传感器的电容测量技术	319
	参考文献	322

第 1 章 绪 论

21 世纪是科学发现和技术发展出现密集创新的时代。其中,新材料的开发及利用已被世界公认为最重要、发展最快的高新技术之一,它对工业、农业、社会以及国防和其他高新技术的发展都起着重要的支撑作用。

在各种新材料中,聚合物类智能材料由于具有质量轻、变形大、生物兼容性好、疲劳寿命好、成本低、易于成形等优点而引起了学术界的广泛关注。这类智能材料能对多种外界激励产生响应,如电、热、光、磁、化学浓度、生理 pH 等,响应包括体积扩张、形状重构、颜色变化等多种形式,因而为物理学、化学、力学、机械结构学等多学科的研究提供了良好的契机,同时也促进了学科之间的交叉发展。

在聚合物类智能材料中,电活性聚合物(electroactive polymer, EAP)是备受关关注的一种新型功能材料。在外电场激励下, EAP 材料可以显著改变自身形状尺寸,外界电激励撤销后又能恢复到原始的形状尺寸;此外,这种效应也是可逆的,即 EAP 材料在外力作用下发生形变,能产生相应的电信号输出。因此, EAP 材料是近年发展起来的一种具有传感和驱动双重功能的新型柔性智能材料。

1986 年,美国 *Science* 期刊首先对 EAP 材料进行了报道^[1],接着学术界对 EAP 材料开展了大量的研究,使其成为现代智能材料的研究热点和前沿问题之一。表 1.1 是 EAP 材料与传统智能材料的性能比较。由表可见, EAP 产生的电致应变比传统的形状记忆合金高出两个数量级,比压电陶瓷有更低的密度^[2]。

表 1.1 EAP 与传统材料性能比较^[2]

性能	EAP	压电陶瓷	形状记忆合金
应变	>100% *	0.1%~0.3%	<8%
应力	0.1~3MPa	30~40MPa	700MPa
响应速度	10 ⁻⁶ ~1s	10 ⁻⁶ ~1s	1s~1min
密度	1~2.5g/cm ³	6~8g/cm ³	5~6g/cm ³
驱动电压	1~5V 或 10~100V/ μ m	50~800V	无
功耗能级	毫瓦	瓦	瓦
断裂韧性	柔性	脆性	弹性

* 施加等双轴预拉伸后产生的驱动应变。

EAP 材料的主要成分是高分子聚合物材料,其中还可能包含溶液、金属离子、碳纳米管、陶瓷颗粒等不同组分,不同的组分构成不同类型的 EAP 材料。按照作用机理的不同,EAP 材料主要分为两大类:离子型 EAP 和电场型 EAP。

离子型 EAP 所需的驱动电压比较低(1~5V),其致动原理是在电场作用下,材料内部的离子及溶剂重新分布而产生大变形,主要类型有电响应离子凝胶、离子聚合物-金属复合材料、巴基凝胶材料和导电聚合物材料等,其中最具代表性的是离子聚合物-金属复合材料。离子的移动需要溶液环境的辅助,因此该类 EAP 材料工作时需保持表面湿润,与电场型 EAP 材料相比,其响应速度普遍较慢。电场型 EAP 对环境无特殊要求,可以直接在空气中工作,但所需的驱动电压(或电场强度)高,从数兆伏每米到数百兆伏每米。电场型 EAP 材料致动原理是在电场作用下,在材料内部产生静电应力并引起分子构型改变而发生大变形,主要包括介电弹性体、铁电聚合物、电致伸缩嫁接聚合物和液晶聚合物等,其中最具有代表性的是介电弹性体。图 1.1 是电场型 EAP 材料的典型代表——介电弹性体(dielectric elastomer,DE)材料以及离子型 EAP 的典型代表——离子聚合物-金属复合材料(ionic polymer-metal composites,IPMC)的变形机理。可见,DE 材料在电场作用下在与电场一致的方向发生压缩变形,而在与其垂直方向发生面内扩张变形,IPMC 则在电场作用下发生弯曲变形。

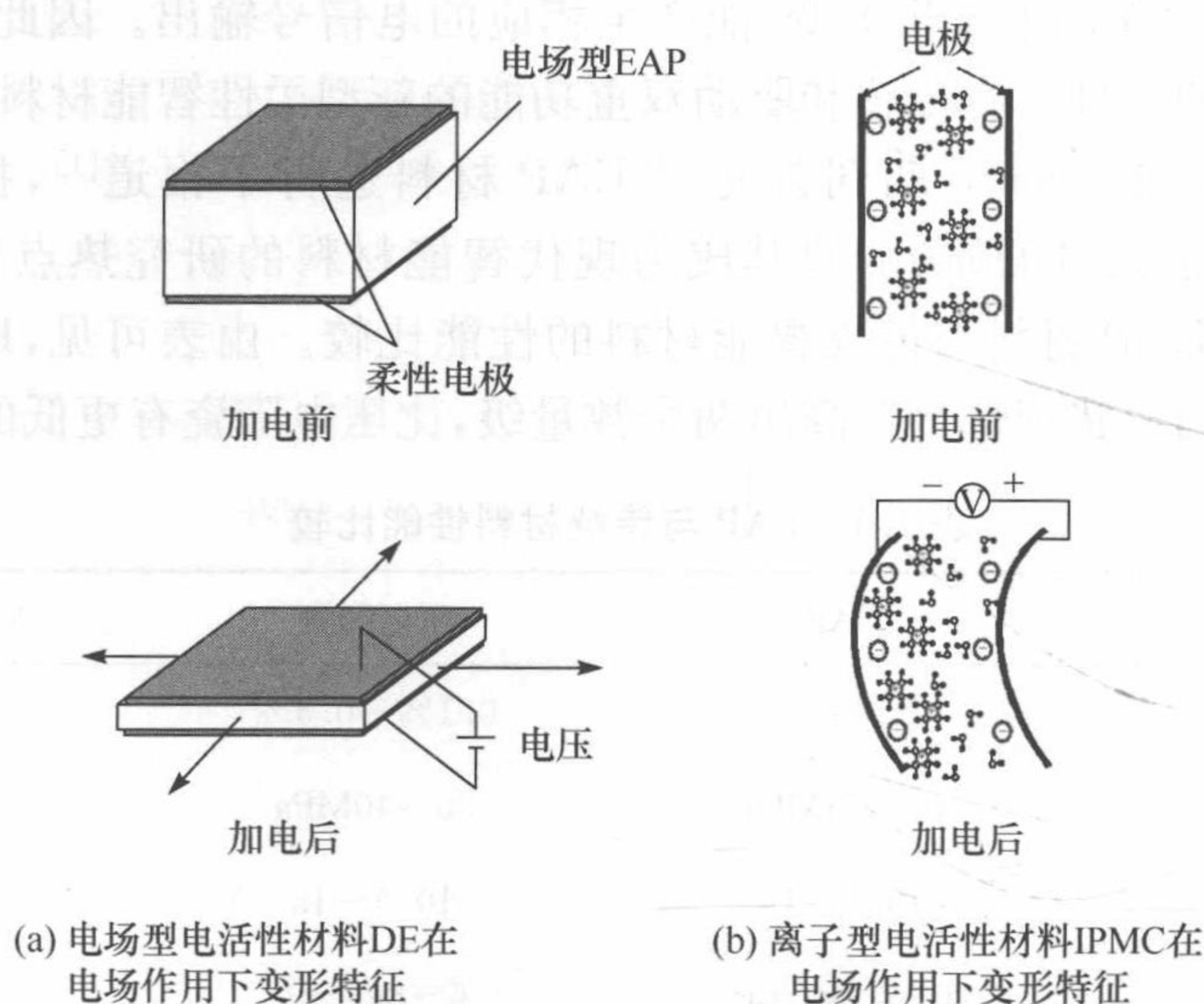


图 1.1 两种典型电活性聚合物 DE 和 IPMC 的变形机理^[3]

在电场型 EAP 材料中,DE 材料具有能量密度高、应变大、价格低、质量小、材料已达到商业化等优点,因此是最受广泛关注和研究的 EAP 材料。近 20 年来,关于 DE 材料的理论与应用开展了大量研究。为此,本书将围绕 DE 材料,从 DE 材

料的变形机理、性能特征、应用研究等多方面进行介绍,从而为 DE 研究的进一步改性及实际应用奠定基础。

1.1 介电弹性体材料及其基本特性

与离子型 EAP 材料不同,DE 材料内部不含金属离子,是一种绝缘体。由于其非导电特性,在电场作用下,DE 材料的上下表面会积累正负电荷,正负电荷之间互相吸引而形成静电压力,在这种压力作用下,材料的不可压缩性,使得其在厚度方向上发生压缩变形而在平面方向产生扩张变形,如图 1.1(a)所示。

DE 材料的变形尺度很大,一般可超过 100%,响应速度在毫秒级,最大应力可到 3.2MPa,能量密度可达 3.4J/g,机电转换效率可达 80%^[3]。也就是说,DE 材料的应变与电磁伸缩材料在一个数量级,但单位体积的驱动应力比压电材料和电磁伸缩材料均小,整体性能和生物肌肉组织非常相似,因此在研究之初,DE 材料也被称为人工肌肉材料。

2002 年,美国光学工程协会(SPIE)组织了首届关于 EAP 材料的学术会议(Conference of Electro Active Polymer and Applied Devices,EAPAD 会议),会议中展示了一个利用 DE 材料制作的机器手臂与人进行掰手腕比赛^[4],如图 1.2 所示。此后在每年的会议上都有基于 DE 材料的新的机器手臂出现,其体积越来越小,输出力越来越大,也越来越接近人体的肌肉功能^[5],表明 DE 材料的研究探索在逐渐深入和成熟。

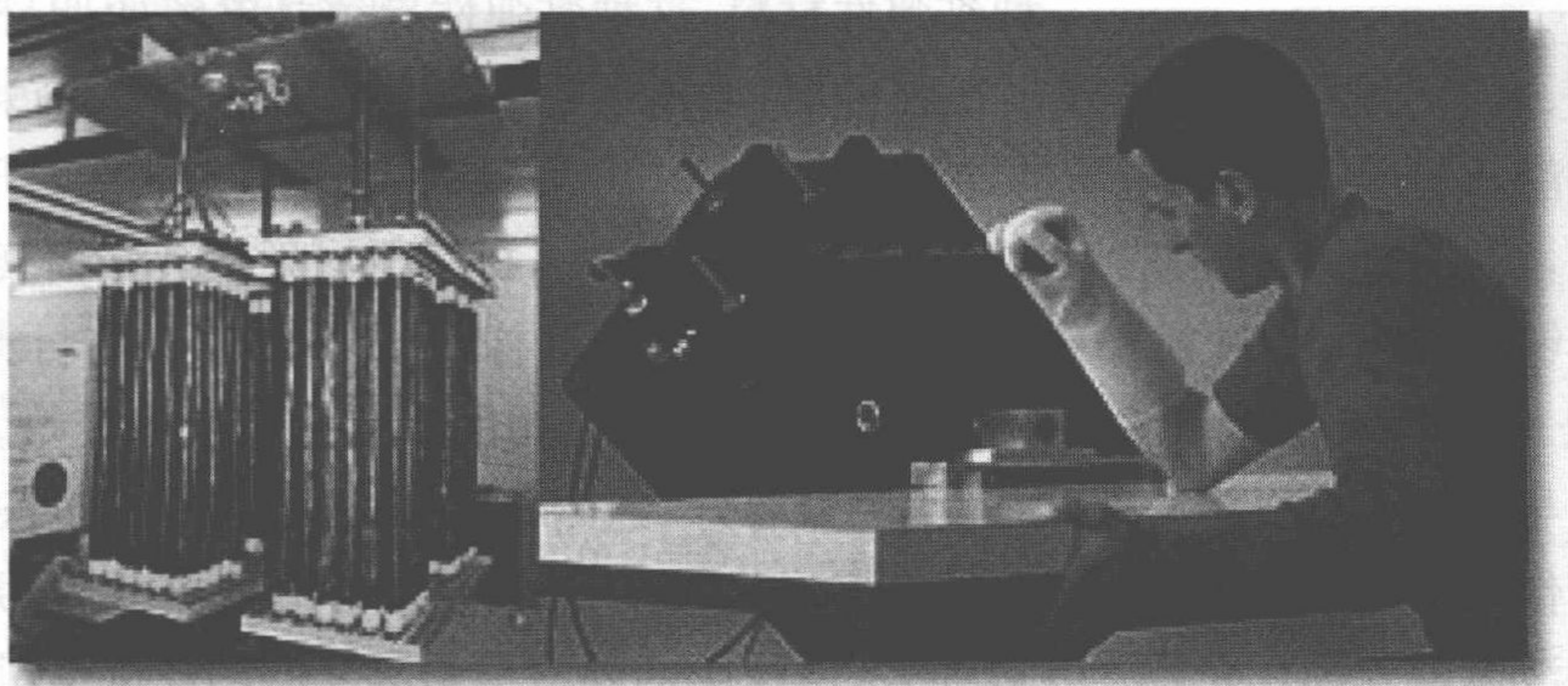


图 1.2 基于 DE 材料制作的驱动手臂与人进行掰手腕比赛^[6]

DE 材料是一种高弹性的高分子聚合物,由芯层的聚合物薄膜和上下柔性电极组成。聚合物薄膜受到电场的作用产生面积扩张变形,而柔性电极将外界的电压信号输送到薄膜表面,起到导电介质的作用。显然,聚合物薄膜和柔性电极材料

均会对 DE 材料的性能产生影响,下面将对聚合物薄膜和柔性电极材料分别进行介绍。

1.1.1 DE 材料聚合物薄膜

根据 DE 材料的驱动原理,只要是绝缘的聚合物薄膜都可以在电场作用下产生变形,而薄膜的物理属性决定了其变形的尺度。DE 材料的物理属性包括弹性模量、材料韧性、机械强度、介电常数、电场强度等。塑形薄膜的弹性模量大,变形小,当施加电场时,随着电压的增大,在产生显著变形之前材料就会发生电击穿行为,其变形尺度与传统的压电材料相当。因此,要想作为大变形驱动器使用,DE 材料聚合物薄膜应该具有适度的柔韧性,才能实现大尺度的应变输出。现有文献报道中,所采用的 DE 材料薄膜包括 VHB 系列薄膜、各种属性的硅橡胶材料、基于 Latex 系列的天然橡胶材料等。

VHB 材料是 3M 公司生产的聚丙烯酸酯薄膜,厚度从 0.13mm 到 1mm 不等,是目前使用最广泛的 DE 材料聚合物薄膜,其分子式如图 1.3 所示。

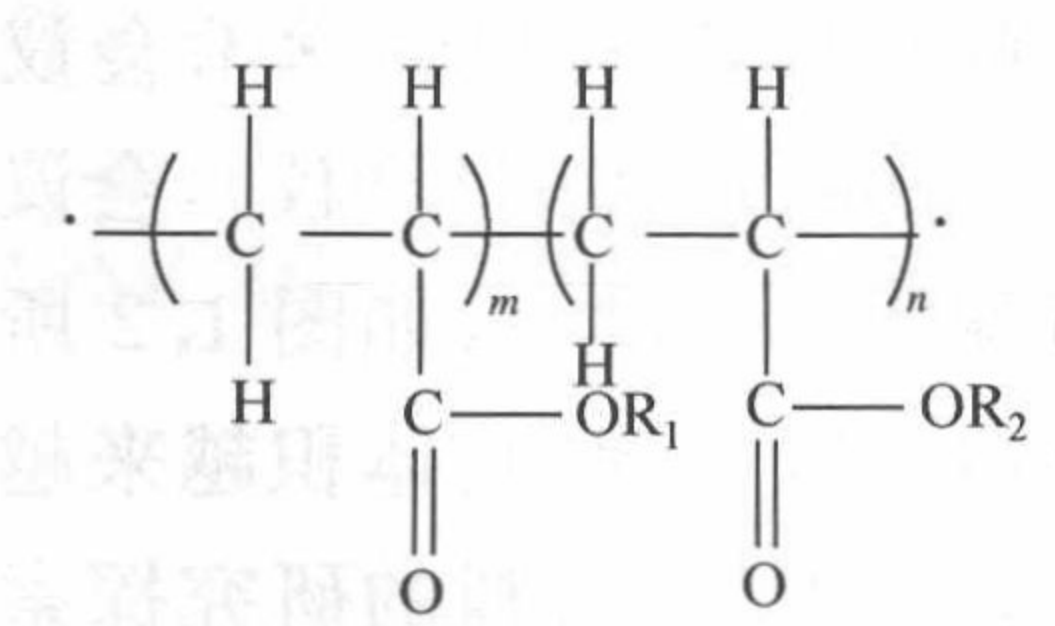


图 1.3 VHB 材料的分子式^[7]

VHB 材料的特点是弹性模量低,仅为千帕量级,在特定条件下其电致变形最高可达到 2200%^[5]。VHB 材料是 3M 公司的商业化产品,可以在市场上买到成品薄膜直接进行驱动结构的制作和研究,因此它是目前 DE 材料研究领域的主要对象。VHB 材料的缺点是具有非常高的黏性,因此实际上是一种黏弹性材料,这种黏弹性导致其电致变形、机电耦合效率、变形稳定性等均表现出很强的时间相关性。此外,黏弹性还具有耗能特性。在静态变形中,随着电压的加载和卸载,VHB 材料的应力-应变曲线会形成迟滞回线,存在明显的残余应力与应变;在动态变形中,材料阻尼导致其振幅衰减。

能够弥补 VHB 材料黏弹特性的 DE 材料是硅橡胶材料。硅橡胶材料包括 Tow 公司的 HS3 系列和 Sylgard186 橡胶,Nusil 公司的 CF19-2186 橡胶等。这些硅橡胶与人体肌肉组织质地相似,生物兼容好,因此在医疗整形中应用较普遍。如果将其作为 DE 材料应用于电活性的变形材料,一般需要制备硅橡胶薄膜,并对硅橡胶的液体组分进行配比。一般而言,硅橡胶的弹性模量高于 VHB 材料,其变形尺度也小于 VHB 材料。表 1.2 给出了文献[8]对 VHB 材料和硅橡胶材料的驱动性能比较。

表 1.2 VHB 材料和硅橡胶材料的驱动性能比较^[8]

性能	硅橡胶	VHB
最大变形/%	120	380
最大应力/MPa	3.2	7.7
最大能量密度/(kJ/m ³)	750	3400
密度/(kg/m ³)	1100	960
疲劳寿命	10 ⁷	10 ⁷
机电效率/%	80	90
温度范围/℃	-100~250	-10~90

实际上可用于电驱动的 DE 材料很多,其性能之间差异也较大。表 1.3 是各种商用的 DE 材料物理属性的比较。由表可以看出,同一种 DE 材料,预拉伸变形不一样时,其应变、杨氏弹性模量、电场强度等物理属性也不同。

表 1.3 各种商用的 DE 材料的物理参数比较^[9]

材料	预拉伸 /%	厚度应变* /%	面积应变* /%	杨氏弹性 模量/MPa	电场强度** /(V/ μ m)	介电常数
硅胶(Nusil,CF19-2186)	—	32	—	1	235	2.8
硅胶(Nusil,CF19-2186)	(45,45)	39	64	1.0	350	2.8
硅胶(Nusil,CF19-2186)	(15,15)	25	33	—	160	2.8
硅胶(Nusil,CF19-2186)	(100,0)	39	63	—	181	2.8
硅橡胶(Dow Corning,HS3)	—	41	—	0.135	72	2.8
硅橡胶(Dow Corning,HS3)	(68,68)	48	93	0.1	110	2.8
硅橡胶(Dow Corning,HS3)	(14,14)	41	69	—	72	2.8
硅橡胶(Dow Corning,HS3)	(280,0)	54	117	—	128	2.8
硅橡胶(Dow Corning Sylard 186)	—	32	—	0.7	144	2.8
硅橡胶(Burman Cine-SkinArBrC)	(0,100)	11	—	0.04	15	4.8
硅橡胶(BJB,TC-5005)	(0,100)	1.0	—	0.1	8.0	3.5
硅橡胶(Dow Corning Sylard 184)	(0,10)	0.5	—	2.49	119	2.8
硅橡胶(Wacker ElastosilRT 625)	(0,10)	12	—	0.303	75	3.2
硅橡胶(BlueStar,MF620U)	(50,50)	—	3.5	0.29	56	3.1
氟硅橡胶(Dow Corning 730)	—	28	—	0.5	80	6.9
氟硅聚合物(Lauren,L143HC)	—	8	—	2.5	32	12.7
聚氨酯(Dccrfield PT6100S)	—	11	—	17	160	7
聚氨酯(Polytek Poly74-20)	(0,10)	1.2	—	0.292	—	7.6