第 49 卷 第 9 期：3573-3583 高电压技术 Vol.49, No.9: 3573-3583
2023 年 9 月 30 日 High Voltage Engineering September 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231183

先进电工材料发展战略

程时杰[1,2]，周　敏[1,2]
（1. 先进电工材料学科发展战略研究小组，武汉 430070;
2. 华中科技大学电气与电子工程学院，武汉 430070）

摘　要：电工材料是电气装备的基础，材料特性直接决定电气装备的极限电磁参数。该文深入探讨了导电材料、绝缘材料、半导体材料、磁性材料与电化学储能材料等几类电工材料的战略研究价值、国内外研究现状、国际前沿动态、学科优先发展方向等；总结了各类电工材料的关键科学问题，指出了我国先进电工材料的重点研究方向与发展战略规划，为从根本上解决制约我国电气装备关键特性的材料基础科学问题提供理论支撑与技术指导。
关键词：先进电工材料；导电材料；绝缘材料；半导体材料；磁性材料；储能材料

Development Strategy of Advanced Electrical Materials

CHENG Shijie[1,2], ZHOU Min[1,2]
(1. Research Group of Development Strategy for Advanced Electrical Materials, Wuhan 430070, China;
2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Electrical materials are the foundation of electrical equipment, and their characteristics directly determine the limitations of electromagnetic parameters for electrical equipment. Therefore, in-depth investigations are performed on the strategy research value, state-of-the-art theories and R&D trends of advanced electrical materials, including conductive materials, insulating materials, semiconductor materials, magnetic materials, and energy storage materials. In addition, the key scientific problems are summarily presented, and the future development strategies for advanced electrical materials are proposed, which provide theoretical guidance and technical supports for the development of future electrical equipment with the ability to challenge more stringent limits of electromagnetic parameters, and to meet the purpose of exploring unknown phenomena and discovering novel natural laws.
Key words: advanced electrical materials; conductive materials; insulating materials; semiconductor materials; magnetic materials; energy storage materials

0　引言

电气化被认为是 20 世纪人类最伟大的工程技术成就。电能在终端能源占比持续增长，正在成为现代人类社会必不可少的物质基础[1]。电工材料是电气装备的基础，材料特性直接决定电气装备的极限电磁参数。作为电与磁的重要载体，电工材料已经渗透到能量转换、传递、存储、利用的各个方面，正在以更快速度向更新、更高、更强、更大、更精的方向发展。

随着电气化向更宽和更深的方向发展，先进电工材料的发展面临着重要的挑战和难得的机遇。首先，以传统电工材料为基础的发、输、配、用电装备，在使用过程中常受到材料电磁参数的限制，无法满足复杂运行环境下大容量、高参数电力应用的需求；另一方面，现阶段，我国电工材料基础与应用方面的相关研究与西方发达国家相比存在较大差距，高端材料自给率较低，严重受制于人。

现阶段，随着科学技术的不断进步和生产、生活水平的不断提高，人们对于电气装备的功能和性能提出了新的要求，先进电工材料的发展也呈现了新的态势。先进电工材料的发展方向可以简单概括为两个方面：一是开发出具有更多超乎寻常功能的电工材料，以实现具有完全不同用途的电气装备；二是大幅度提高现有电工材料的电气性能和其他相关性能，使生产的电气装备具有挑战工作极限的能力，以帮助人们更深入地探索物质世界、发现更多

基金资助项目：国家自然科学基金(L1824023；52077095)；中国科学院学部发展战略研究项目(NFSC-CAS 联合项目)(XK2018JSC001)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (L1824023, 52077095), Development Strategy Research Project of Chinese Academy of Sciences(NFSC-CAS Joint Project)(XK2018JSC001).

的未知自然现象和自然规律，更有效地解决单靠人力无法解决的问题。

1 先进电工材料的科学意义与战略价值

前沿科学研究迫切需要能适应极端电磁条件的电工材料，清洁化电力系统、电气化交通、现代国防装备、高端科技仪器以及先进电磁医疗装备等对电工材料的性能也提出了更高的要求。

21 世纪以来，以电为中心、清洁化为特征的能源结构调整加快推进，风能、太阳能等可再生能源的大规模开发利用已成为世界主要国家发展新一代电力系统的共同选择。从根本上说，有效提高电网对可再生能源的接纳能力，建设高效智能电网，实现以清洁能源为主体的能源革命，关键是发展适应复杂电网结构的高效电能转换技术，超远距离跨洲际互联的特高压、大容量柔性直流输变电技术、基于现代电气设备的低成本长寿命大规模储能技术等。电工材料与器件渗透在发电、输电、配电与用电的各个环节，是所有电工设备、电气装备以及电子器件的基础，在以清洁能源为主的能源革命中发挥着基础性与支撑性作用。其中，大容量远距离输电技术需要导电材料兼具优异的力学与电学性能。绝缘材料具备高击穿场强、耐高低温和耐候等特性；储能技术的规模化应用则需要降低储能材料成本、提高其电化学稳定性以及耐超高低温、辐照等极端环境的能力；发展大容量、长寿命、低成本、高安全的储能技术是支撑能源结构平稳转型的核心问题。功率半导体器件是实现电能转换的核心，其升级换代也促使着现代电力电子技术朝着全控化、集成化、高频化、控制技术数字化和电路形式弱电化不断发展。

发展电气化交通，以电代油是降低石油消耗、提高能源效率、改善环境质量的重要途径，也是实现交通能源转型和升级的根本方向。交通电气化的核心是大力发展以电动汽车和轨道交通为核心的清洁交通工具。电动汽车的发展需要实现基于永磁材料的高功率密度、高转矩密度、高可控性、高效率、高性价比的永磁电机以及高能量/功率密度、低成本的电池技术。高性能的钕铁硼永磁材料作为制造新能源汽车的动力电机的主要材料，可以明显减轻电机重量，提高电机性能，实现高效节能。《“十四五”国家重点研发计划“新能源汽车”重点专项》要求锂离子动力电池容量>2 Ah, 比能量>500 Wh/kg。为实现这一目标，开发全新的储能材料以及下一代电池体系具有重要的科学和应用意义；轨道交通方面，高铁的安全运维与良性发展离不开弓网能量传递系统的可靠服役，而受电弓滑板材料是高铁能量供给的“咽喉”，需要兼具抗冲击、耐电弧、高导电、耐磨损等要求，以实现高铁“走出去”的国家重大战略。

现代信息化战争既是高技术装备之战，也是高性能材料之战。以电磁能武器为代表的现代国防装备，具有能量利用率高、以快制慢和性能调控容易准确的突出优势，必将成为当前各大军事强国竞相发展的颠覆性武器装备。电磁能装备工作于多场强耦合的极端工况，对基础核心材料的性能提出了更高要求。导电材料需要承受高达数兆安的极高电流、高达数兆牛的极大电磁力、高达数百兆帕的极强应力和极大变形等，同时兼具高强高导高韧等指标；绝缘材料除了受到电场作用外，还同时承受超高声速气流冲刷、瞬时高温气体热载荷、超高气压的剥离等作用，传统的绝缘材料已经无法满足上述要求，需要开发具有高强、耐高温以及抗冲击性能的新型绝缘材料；电磁能装备工作于强磁场环境，磁感应强度高达几十特，而传统的磁性材料在高磁场环境下相对磁导率衰减至接近空气且电导率较高，严重制约着电磁能装备性能提升，同时其产生的涡流损耗较大。通过材料结构的巧妙设计、构建具有特殊电磁特性的功能材料，如左手材料、超磁致伸缩材料、智能材料等，可以为实现国防装备电磁特性的突破开辟新的路径。

在高端科学仪器方面，超高磁场(>30 T)对于基础科学研究设施、生物医学工程、高精度的科学仪器的发展具有极其重要的作用，是支撑重大原始创新的“国之重器”。产生超高磁场的磁体由导体绕制的线圈和纤维加固材料交替分层缠绕而成。导体材料要具有 1200~1500 MPa 的超高机械强度、65%~90% IACS 的电导率、良好的室温延展率、较高的热传导率等特点。当磁感应强度较低时，冷拉硬铜是比较理想的导体材料。随着磁场强度的不断升高，纯铜的抗拉强度已无法满足需要，一系列铜基复合材料被相继开发。其中，CuNb 表现出最高的机械强度(1200 MPa)。当磁感应强度达到 100 T 时，电磁应力高达 4000 MPa。为了承受强应力需求，除了需要进一步发展高强度 CuNb 复合材料之外，还需要开发具有更高强度的力学加固材料，如玻璃纤维、碳纤维等。

在高端电磁医疗设备中的应用方面，以核磁共振成像(nuclear magnetic resonance imaging，NMRI)、电磁导航、重离子加速为代表的系列高端医疗装备对于磁性材料、超导材料、绝缘材料的性能也具有超强的要求。其中，磁性材料是低场磁共振成像设备的重要材料，需要具备高矫顽力(>15 kOe)、低损耗特性，现阶段主要为钕铁硼稀土永磁材料；高性能超导材料是高场磁共振成像(magnetic resonance imaging，MRI)和重离子加速的基础，需要具备更高的载流密度(J_c >2800 A·mm^{-2}@5 T)、更高的机械强度(700~800 MPa)以及更好的稳定性(剩余电阻率>100)。除了常规使用的 NbTi 低温超导材料外，目前正在推进具有更高临界场的 Nb_3Sn 材料、YBCO 二代高温超导材料等的医疗应用。

2　国内外研究现状

根据电工材料在应用对象(即电工技术领域)中所扮演的角色，本文集中讨论了先进导电材料(包括超导材料)、先进绝缘材料、先进电力半导体材料、先进磁性材料与先进电化学储能材料方面的相关问题：阐述了电工材料的国内外研究现状与发展趋势，归纳了材料研发过程中需要解决的关键科学问题与技术挑战，进一步结合我国的实际情况，指出了重点发展方向。

2.1　导电材料

导电材料是实现电能输送、信息传递以及电−磁−光−热等能量转换的基础材料。由于我国能源产需地域分布极不均衡，造成了电能输送具有跨区域、远距离和大规模的特点。发展高性能导电材料不仅是实施高效电力节能的重要技术手段，还有助于挑战更高的电磁参数极限、生产出具有更好电磁性能的新型电工装备。目前，先进电工导电材料主要包括传统铜铝材料、超导材料、碳纤维增强复合芯导线以及电接触材料等，其共性需求是高电导率、高机械强度、轻质、抗拉、低弧垂、耐高温、耐烧蚀、耐腐蚀、耐磨损等。

2.1.1　研究进展

1）传统铜铝材料

传统铜铝材料主要朝着精细化、合金化以及纳米化等方向发展。随着电子技术的发展，微电子、超微电子产品越来越普及，对超精细高性能铜导线材料的需求越来越大。我国对于不同规格的铜导线的供需关系存在巨大差别：0.04 mm 以上的丝线，供大于求；超细(0.015~0.04 mm)铜导线，60%以上需依靠进口；0.015 mm 以下的超精细铜导线，主要依赖进口。以铜和铝为代表的传统高电导率金属材料在应用中最大的问题是强度不足(纯铜屈服强度仅为 20~50 MPa)。以纯铜为基体，加入一种或几种其他元素制成的铜合金，具有高导电性、高导热性、高强度和易加工性等优异的性能。目前，高速铁路多采用 Cu-Ag、Cu-Sn、Cu-Mg 等高强高导电铜合金接触线[2]。另一方面，将金属显微结构尺寸减小至 100 nm 以内，可以有效提高其强度。纳米晶或纳米孪晶结构的纯铜的强度极限可由 400 MPa 提高至 1 GPa 以上，且可以兼顾金属材料的电导率[3-4]。

此外，将性能优异的纳米碳材料(碳纳米管和石墨烯)与铜复合是实现超高导电性能的一种有效途径。通过电化学沉积制备的铜/碳纳米管复合导体以及化学气相沉积法制备的铜/石墨烯复合导体可以获得超过 105% IACS 的电导率。目前纳米碳增强的铜基复合导体已成为高性能导电材料领域的重要研发方向。

2）超导材料

实用化超导材料主要分为以 NbTi 和 Nb_3Sn 为代表的低温超导材料和以 YBCO(钇钡铜氧)为代表的高温超导材料。

商品化 NMRI 全部采用 NbTi 超导线材制备，其导线结构主要有 Monolith 结构和 Wire-in-Channel 结构。2005 年以来，我国西部超导材料科技有限公司借助于参与 ITER 项目的机会，就 NbTi 超导线材的制备进行了国产化技术开发，实现了产业化，建成了国际先进、国内唯一的 NbTi 超导线材生产线，有望全面推动我国超导 MRI 技术和产业的发展。Nb_3Sn 属于 A15 结构的化合物，是典型的晶界磁通钉扎超导体，具有高 T_c(18.3 K)、高 H_{c2}(约 22 T)和高 J_c(106 A·cm^{-2})，是制作 10 T 以上超导磁体的最理想高场超导材料之一。目前 Nb_3Sn 超导线材的制备工艺主要有：青铜法、内锡法和粉末装管法等。

YBaCuO(YBCO)超导体是第一个被发现的 T_c>77 K 的高温超导体，外延生长的 YBCO 超导薄膜的 J_c 在 77 K 零场下一般都能达到 104 A·mm^{-2}，最高的已经达到 107 A·mm^{-2}。YBCO 超导体具有非常优异的磁场性能，它在 77 K 下的不可逆场达到了 7 T，高出 Bi-2223 一个量级，是真正的液氮温区下强电应用的超导材料。我国从“十三五”就开始布局研究第二代高温超导带材，苏州新材料研究所

2016 年底制备出一根 1130 m 长的超导带材，超导临界电流达到了 570 A·m^{-1}(77 K，自场，12 mm 宽带)，进入世界最好水平行列。

近日，韩国科研团队宣称发现了常压室温超导体 LK-99 晶体，在正常大气环境下，可在 127 ℃以下实现超导。相关研究掀起了全世界的研究热潮，中美俄实验室“初步验证”了相关实验结果，相关电学测试有待进一步研究。

3）碳纤维复合芯

碳纤维复合芯导线是一种全新概念的输电线路用导线，具有高容量、低损耗、节能环保、重量轻、抗拉强度大、耐高温、耐腐蚀、热膨胀系数小等特点[5]。在已经取得的新型复合材料合成导线中，日本的碳纤维芯铝绞线、美国的碳纤维和玻璃纤维混合芯铝绞线较为典型。我国碳纤维复合芯导线研究起步较晚，现阶段的应用以增容改造为主，由于存在安全可靠性、经济实用性、运行稳定性的问题，在新建线路中并未得到大规模推广。但从电力工业未来发展的大趋势看，碳纤维复合芯导线在今后的特高压工程中，必将广阔应用。

4）电接触材料

触头是开关中实施接通和断开的关键核心部件，110 kV 及以上电压等级的高压断路器中采用的是 CuW 假合金；35 kV 以下中压断路器采用的是 CuCr 假合金；10 kV 以下低压、中低负荷使用的是银基触头材料。现阶段，主要通过纳米技术、添加稀土元素、复合强化等提高触头材料的耐电弧烧蚀性能和高温热稳定性。

电磁炮导轨材料需承受兆安级脉冲电流，同时兼具高强度、耐烧烛性、耐磨性、耐高温和抗氧化性等综合性能。复合材料技术可以获得强度与导电性的较好结合，合金化能够在大幅度提高金属材料强度的同时，保持较高导电性，而表面改性技术能够在不影响基体材料性能的同时赋予材料表面某种特殊性能。如果把这 3 种方法有机结合在一起，就有可能实现铜合金综合性能的突破。

我国电气化铁路建设都以架设铜接触网导线为主。按不同材料来分，电力机车受电弓滑板包括纯金属滑板、纯碳滑板、粉末冶金滑板、浸金属碳滑板和碳基复合材料滑板[6]。其中，碳基复合材料滑板具有抗冲击性能优异、密度轻、价格低、自润滑和对导线磨耗小等优点，有望成为未来的主流滑板材料。

2.1.2 关键科学问题与重点发展方向

导电材料的关键科学问题主要有：(1)导体材料微合金化理论及复合相设计与组织均匀性调控机理；(2)导电材料的界面及性能均一性调控机理；(3)制备加工工艺−组织演变−力学/物理性能的定量关系；(4)极端条件下导电材料的组织结构演变规律及其定量描述。

导电材料的重点发展方向为：(1)通过结构设计和微结构控制，提高超导材料无阻载流和产生强磁场的能力，改善超导材料的磁通钉扎特性、增强稳定性，以提高性价比并满足实际应用的需求；(2)发展高精、极细(薄)、超长以及高强、高弹、高导的铜铝导线材料；建立新型高性能铜铝导体材料及其产品的设计选型、加工制造、检验及其运行维护的技术标准体系和研发平台；(3)批量化生产以及机械合金化制备碳纳米管/金属复合材料技术；(4)加快碳纤维芯导线原材料碳纤维的国产化进程，完善复合芯导线的专业设计软件以及工程应用数据库；(5)发展新型触头材料的短流程低成本制造技术、失效控制与延寿技术。

2.2 绝缘材料

电工绝缘材料作为电工电子装备的基础材料，对电力、轨道交通、新能源、微电子、航空航天、国防军工等领域电工电子装备的革新换代具有基础性、支撑性、先导性的作用。随着电气设备向大容量、高电压、高功率密度化和小型轻量化发展以及微电子和集成电路向高速度、高集成度方向发展，高性能绝缘材料的研究和开发迫在眉睫。面向多性能、极端性能的绝缘材料，关键在于：(1)极端条件(高海拔、低温、强辐射、空气稀薄等)以及极端使用条件下(超高速、高压、大电流、小型化、短时脉冲工作等)绝缘材料的失效规律与机理研究；(2)结合物理、化学、材料学等手段，开展超高压、特高压、高海拔、高湿度、低气压等服役条件下，材料合成与制备的理论学以及方法学的研究。

2.2.1 研究进展

1）高击穿场强绝缘材料

击穿场强是评价绝缘材料介电性能的基本参数。采用具有绝缘、导电或导热特性的纳米尺度粒子改性聚合物基体，制备纳米复合电介质材料，进一步通过表面修饰和微观−介观−宏观的关联研究是开发高击穿绝缘材料的发展趋势[7-8]。欧洲日本等国已经可以生产 500 kV 直流电缆，其 320 kV 直流

电缆附件已经实现了工程应用，核心制造方面处于领先地位。而我国高击穿场强材料的研究主要存在缺乏对电介质击穿过程和耦合作用下击穿机理的深入理解，材料更新换代缓慢等问题，产品结构、技术水平、质量性能、技术开发等方面国际竞争力有待提升。

2）智能绝缘材料

自适应材料一般由微米、纳米功能填料填充高分子聚合物来实现，这类材料能够实现“电场提升—材料电导/介电提升—电场下降”的负反馈闭环条件过程，能够均匀电场。伦斯勒理工学院以及 ABB 公司等研究者报道了将纳米尺寸的 SiC 填料掺入硅橡胶基体中也可以获得一定的非线性特性，发挥很好的均匀场强的功能[9]。自修复材料的研究工作主要集中在对材料机械损伤的修复上，清华大学的何金良等提出了光触发基体/微胶囊自愈绝缘材料体系，为实现高绝缘强度的电树枝缺陷自修复体系奠定了基础[10]。

3）耐电晕、耐电痕化绝缘材料

在聚合物中加入一定量纳米尺度的氧化硅或氧化铝可以大幅度提高聚合物基体的耐电晕老化特性；通过提高材料的抗污能力、抑制放电、提高耐放电侵蚀能力、阻碍炭层形成、改善绝缘电场分布等手段都可提高绝缘材料的耐电痕化老化能力[11]。近年来，随着我国高速铁路技术的快速发展，对变频牵引电机耐电晕绝缘材料的需求日益迫切，但国产聚酰亚胺耐电晕绝缘材料与杜邦 100CR 薄膜在电气绝缘性能、耐电晕性能、力学性能及尺寸稳定性等方面都存在一定差距，主要是基础研究方面对电晕、电痕化老化机理及其老化过程缺乏足够理解[12]。

4）高导热绝缘材料

导热与绝缘是一对矛盾体，如何兼顾导热性和绝缘性是一个世界级的难题。日本和美国在高导热绝缘材料的研究方面处于领先地位。目前，国内外的研究主要集中在两个方面：一方面可以增加聚合物的有序度与结晶度、减少内部缺陷、引入液晶结构等；另一方面可以通过填充金属氧化物(MgO、Al_2O_3)、金属氮化物(AlN、BN)和碳化物(碳化硅)，在兼顾绝缘性能的同时提高导热性。

5）耐高低温绝缘材料

开展耐温等级超过 H 级(180 ℃)的聚合物绝缘材料以及耐超低温(液氦温度为−196 ℃，液氦温度为−269 ℃)绝缘材料的基础与应用研究对工作于特种环境的电力设备具有重要意义。耐高温材料主要包括清漆、薄膜、塑料等，耐低温材料除了传统的聚酰亚胺外，还包括新型的玻纤增强塑料、柔软性环氧树脂等。我国在耐高低温聚合物电工绝缘材料研究方面基本上与国外同时起步，但军用飞机、深空探测等特种耐高低温绝缘材料全部依赖进口。

6）耐辐照、耐候绝缘材料

目前主要是通过复合高分子材料和无机物，或者材料外层增加防护层来提高材料耐辐照性。国内对应用于航空航天等高辐照环境下的聚醚醚酮需求量很大，但国产的聚醚醚酮稳定性较差，不能用于制造电线电缆。耐候绝缘材料方面，实现长效优能防污闪涂料的途径包括：改善涂料基体材料，改变涂料成分，以及构筑类“荷叶”超疏水结构的材料等。国内外常用的防污闪涂料有硅油、RTV(室温硫化硅橡胶)和 PRTV(持久性防污闪复合涂料)。

7）环境友好型绝缘材料

环保型绝缘气体方面，寻找一种新的能够取代六氟化硫(SF_6)的低温室效应气体显得尤为迫切，相关研究集中在发展氢氟碳化物卤族元素、卤代基团取代的烃类化合物等，如三氟碘甲烷(CF_3I)、八氟环丁烷(c-C_4F_8)、氟代甲基异丙基酮($C_5F_{10}O$)等。绝缘纸的研究集中在天然纤维绝缘纸、纳米改性绝缘纸、芳纶纸基材料等方面，以满足绝缘强度、耐热等级和机械强度等几个方面的要求[13]。此外，开发可以替代矿物油的环保型绝缘油也是世界各国科研机构的研究重点。用植物绝缘油替代矿物绝缘油的相关技术。从油成分上来讲，可将矿物油的替代油分为合成绝缘油、植物绝缘油和混合绝缘油。

2.2.2　关键科学问题与重点发展方向

绝缘材料研究的关键科学问题是：(1)电、磁、热、机械等多物理场长期耦合作用下的老化、劣化特性及其演变规律；(2)微/介观的介电理论、极化的尺度效应以及微观−介观−宏观(3M)理论模型；(3)微观结构−化学成分−宏观性能之间的关联机制、界面调控效应。

绝缘材料的重点发展方向是：(1)极端效应下的电介质击穿理论；(2)电、磁场环境下的导热机制理论的完善和多场耦合导热模型的构建；(3)航空、深海、核能、超导和深空探测等领域耐高低温材料的基础与应用研究；(4)发展主动自修复绝缘材料，简化材料制备工艺，降低材料成本；(5)环保型绝缘气体与固体绝缘材料的相容性及调控方法。

2.3 半导体材料

半导体材料是现代电工电子装备制造的基础，其物理化学性质及电、磁等特性直接影响电力电子系统的性能和水平。现阶段，高比例半导体装备的应用已成为现代电力系统发展的基本特征，高功率密度和极端应用工况对宽禁带半导体技术提出迫切需求，功率半导体及其应用已成为电工/电子学科最活跃的学科分支。

2.3.1 研究进展

1）硅材料及器件

硅是Ⅵ族元素半导体材料，具有储量丰富、化学性质稳定等优点，是集成电路和半导体器件的首选材料。在硅单晶上，直拉法、区熔法是制备大尺寸单晶的主要方法。目前，国际主流产品为 12 英寸，国内仍以 6 英寸以下为主。硅功率半导体器件的先进技术主要掌握在美国、欧洲和日本等少数发达国家的企业中。国内普通二极管、三极管自给率很高，但是高档的功率二极管(如快恢复二极管 FRD)还是依赖进口。晶闸管类器件产业相对成熟，种类齐全。但是功率 MOS 器件与国外先进水平有不小差距。

2）碳化硅材料及器件

物理气相输运(physical vapor transport，PVT)法已成为目前生长大尺寸、高质量碳化硅单晶最成熟、最有效、最成功的生长方法。目前，国际上只有少数几个机构掌握了 PVT 法生长碳化硅单晶的关键技术。我国还不具备大规模制造出高质量 6 英寸碳化硅单晶的能力，碳化硅的厚外延生长质量也有待提高，这直接导致我国还很难制造出超高耐压(>10 000 V)的碳化硅电力电子器件，碳化硅 MOSFET 器件也刚刚处于实验室试制阶段。而国外碳化硅 MOSFET 器件已经更新到了第三代。

3）氮化镓器件

Si 衬底 GaN 材料成本优势显著，易于获得尺寸大、导热性好的材料，而且器件制备可以有效兼容传统 Si 集成电路 CMOS 工艺，是目前工业界普遍采用的技术路线。现阶段，4 英寸和 6 英寸 GaN-on-Si 晶圆已经实现商用化，一些科研机构和公司相继报道了 8 英寸 GaN-on-Si 晶圆的研究成果。国内关于 GaN 材料的研发工作起步于 20 世纪 90 年代，2014 年之后逐渐出现了商用 6 英寸 Si 衬底 GaN 晶片，但规模较小。异质外延氮化镓器件方面，GaN Systems 公司开发了新型增强型器件设计技术和封装技术，实现了 650 V 的 GaN 器件产品。而国内关于氮化镓半导体器件的相关研究还处于起步阶段。

4）其他半导体材料

金刚石作为一种新型宽禁带半导体材料，在力、热、电、声、光和机械等方面都具有优异的性能，适用于制备大功率、超高频电力电子器件[14-15]。氮化铝作为一种典型的Ⅲ族氮化物，是继 Si 和 GaAs 之后的第三代半导体材料之一，是制备光电子和微电子器件的理想材料。氮化铝器件输出功率大，工作温度高(>300 ℃)[16]。目前，在前沿的金刚石与氮化铝材料及器件的研究上，国内外均处于起步阶段，水平相当，基于新型半导体的器件尚未实现产业化。

2.3.2 关键科学问题与重点发展方向

高性能半导体材料的研究需着重解决单晶生长与缺陷控制、掺杂与应力调控以及界面态控制与优化等方面的关键科学问题。主要包括：(1)晶体生长动力学理论，缺陷产生、生长和湮灭的基本过程及其理论；(2)深能级陷阱的形成控制机制及电学行为问题，本征衬底放大过程中的应力控制；(3)碳化硅与栅介质材料各种界面缺陷的形成原因、分布及对器件迁移率、阈值电压稳定性的影响机制。

半导体材料的重点发展方向为：(1)大尺寸碳化硅单晶中的应力消除、位错缺陷的降低和转换；(2)高耐压、超高耐压的 JFET、IGBT、GTO 等器件的研究以及全碳化硅功率模块的开发；(3)研发 3~4 英寸电子器件金刚石晶圆，建立具有自主知识产权的新结构、新方法和新技术。

2.4 磁性材料

磁性材料是电磁能量转换的重要基础材料，广泛应用于电气设备、电工电子仪表、通信与计算机等方面，其发展模式呈现“高频率、高磁密、低损耗”以及“轻质、微型化、多功能”并存的格局[17]。当前，我国电工磁性材料产业发展的一个显著特点为“低端产能过剩、高端供不应求”，严重制约了众多领域的发展。

2.4.1 研究进展

1）电工钢

电工钢是电气工业使用的主体软磁材料，需要具备轻质、高效、低损耗、高强度等特性。面对高频、高压等新领域的种种挑战，电工钢新技术和新产品必须朝着更高性能、更薄规格、适用于更多应用领域的方向发展。硅元素是电工钢最主要的合金元素，如果把电工钢的硅含量进一步提高到 6.5%，与含硅 3%的电工钢比较，其铁损和能耗会成倍降

低[18]。国际研究和开发的重点是高面织构新型无取向电工钢与双取向电工钢。中国内地取向及无取向电工钢相关领域的技术水平正不断接近甚至达到国际先进水平，可制出厚度为几十微米的高硅钢薄带。然而，电工钢属于技术含量较高的品种，国内许多企业现有产品质量水平和技术积累仍保持在较初级的阶段，缺乏具有自主知识产权支撑的核心技术，在对其组织结构控制原理的阐述上还存在不少困难，因而在产品质量的稳定控制和新技术发展上仍存在不少障碍。

2）非晶、纳米晶磁性材料

非晶、纳米晶材料的独特之处在于其微观组织结构是由晶粒尺寸<100 nm 的晶体相和体积分数<30%的残余非晶相构成，具有突出的高频软磁特性[19]。日本在国际上一直引领高能效变压器的发展，拥有完整的非晶合金材料的制造技术和产业链，每年新增高效配电变压器中非晶配电变压器约占 1/3 以上。目前，国产非晶带材的宽度已达到 213 mm，厚度约 23 μm，产品性能和质量全面达到日立金属水平。为了满足不断小型化和高频化的需要，近几年日立金属加大了纳米晶新产品的开发力度，重点在两个方向：一是带材更薄，满足高频化的要求，纳米晶带材厚度从 18 μm 减小到 13 μm；二是饱和磁感更高，满足小型化的需要，开发出纳米晶合金 $Febal.Cu_{1.4}Si_5B_{13}$，在 1.5 T 的损耗(P15/50)达到 0.29 $W{\cdot}kg^{-1}$。近年来，国家十分重视非晶与纳米晶材料的研究。目前国产非晶带材的产品性能和质量全面达到日立金属水平，纳米晶合金薄带大量出口欧洲，成功应用于汽车电子、风力发电、变频驱动等领域。

3）软磁铁氧体

软磁铁氧体的特点为高频率、高磁导率与低损耗，在抗电磁干扰(electromagnetic interference，EMI)领域占据重要地位[20]。基于纳米技术研究、制备高端软磁铁氧体产品是国际上各大科研机构、企业未来的工作重点。日本在研究开发与生产制造方面都处于领先地位，日本 TDK 公司是目前软磁铁氧体的最大生产厂家。近几十年来，我国软磁铁氧体材料发展迅速，通过合理掺杂、优化配方等方式提高产品质量，取得了显著的成绩。

金属磁粉芯是一种广义的软磁复合材料，以金属基磁性颗粒为原料，在颗粒表面包覆绝缘介质，通过粉末成形工艺与热处理退火而得到。金属磁粉芯材料同时继承了金属软磁的高饱和磁感应强度与软磁铁氧体高电阻率的特点。铁粉基软磁复合材料已成为当今世界软磁材料的一大研究热点。我国在软磁复合材料领域与其他国家还有一定的差距，主要产品仍然依赖进口。制约我国磁粉芯技术和产业发展的根本原因是材料的研究仍然集中在材料体系的成分调配与生产工艺的改进方面，鲜有深层次磁学基础理论以及相关科学问题的探讨。

4）稀土永磁材料

钕铁硼永磁体被称为第三代稀土永磁材料，室温下剩余磁感应强度可达 1.55 T，磁感应矫顽力可达 992 $kA{\cdot}m^{-1}$，磁能积的理论极限值为 64 MGOe，是目前磁性能最高的永磁材料，被广泛应用于计算机、新能源、信息通讯、航空航天等领域。我国是世界上最大的稀土永磁材料生产国、出口国和消费国，但存在稀土永磁材料价格偏高、稀土资源管理欠缺、综合研发能力相对较弱以及专利限制等问题。现阶段，开发高性能、高服役特性的低 Nd、低重稀土的烧结钕铁硼永磁材料，开发适用于航空、航天等工作环境恶劣领域的钐钴永磁材料是稀土永磁材料的研究重点。

5）先进功能磁性材料

磁性液体是一种新型的功能材料，兼有磁性和液体的流动性双重性质，还具有非常独特的力学、热学、光学以及声学特性，应用于生物医学、航空航天以及国防军工领域。超磁致伸缩材料是一种新型稀土功能材料，最早应用于军事领域。现阶段的研究主要集中在材料特性建模、器件设计、建模仿真及控制等方面[21-22]。左手材料是一类可通过结构调控来控制电磁参数，实现特殊电磁特性，如负折射、近场聚焦、电磁隐身等的材料。

2.4.2　关键科学问题与重点发展方向

高性能磁性材料的研究需着重解决微观结构动态演变规律、界面处相交换耦合机理以及磁特性测试技术与尽限应用理论等方面的关键科学问题。主要包括：(1)电磁学特性−机械特性−温度特性的耦合作用，电磁场−结构场−温度场−声场的耦合分析；(2)界面原子共格两相的耦合，晶间结构的调控以及界面交换耦合作用机制；(3)材料的尺度极限、材料耐受电场、磁场的极限、极端或非常规条件下的服役特性及测试表征手段等。

高性能磁性材料的重点研究方向如下：(1)加强国内电工钢磁特性检测方法及相关设备的研究，同时制定相应的国际标准；(2)新型永磁相的探索、化

学成分与制备工艺优化以及稀土永磁材料的回收利用研究；(3)设计开发兼备强非晶形成能力、低成本和优异软磁性能的新材料体系，研究非晶纳米晶快速凝固过程平衡的极限稳定性规律；(4)磁性液体传感器及阻尼减振器的建模及优化、超磁致伸缩材料的服役特性的建模仿真以及左手材料频率范围的拓展与完善。

2.5 储能材料

储能技术是实现国家双碳战略目标和构建以新能源为主体的新型电力系统的瓶颈技术，其创新与突破将带动能源格局革命性、颠覆性变化。然而，现有电化学储能技术成本、寿命、安全无法满足以新能源为主体的新型电力系统对储能技术的重大需求，亟需通过原理、材料与技术创新，发展低成本、高安全与可持续的先进电化学储能技术，实现储能技术的高效集成与并网，推动新型储能技术的规模化应用。

2.5.1 研究进展

1）锂离子电池

锂离子电池具有比能量/比功率高、寿命长、充放电速度快、反应灵敏、转换效率高等特点，是现阶段综合性能最为优异的一类电化学储能技术。锂离子电池的发展目标是在进一步提高其能量/功率密度的同时，降低成本、提高安全性能。提升锂离子电池能量密度的主要思路是发展具有高嵌锂电势的高容量正极材料(富锂锰基)[23]、较低嵌锂电势的高容量负极材料(硅负极)[24]以及耐高压电解液[25]。发展耐高压电解液体系主要从 3 个方面展开：一是新型耐高电压溶剂，如砜基电解液、腈类电解液、氟类电解液、离子液体等；二是提高锂盐浓度；三是新型功能化的耐高压添加剂。虽然我国已经形成了完善的锂离子电池产业链，在电力储能的电池材料、电芯、模块、系统制造方面已经达到了世界先进水平。但在下一代高能量密度锂离子电池的关键材料开发方面，还缺乏竞争力。目前除了纳米硅碳负极材料，其他正极材料、陶瓷涂层隔膜材料、高电压电解质材料的核心专利都掌握在发达国家的领先企业手里，急需通过大量的基础研究在专利方面取得突破。

2）高温钠电池

高温钠电池包括钠硫电池和钠−氯化物电池(ZEBRA 电池)。其中，钠硫电池是应用非常成功的一种大规模静态储能技术，在全球储能项目中所占的比例为 40%~45%，占据领先地位。日本在钠硫电池的研究方面处于领先地位，NGK 的钠硫电池已成功应用于城市电网的储能中。国内的中科院上海硅酸盐研究所、上海市电力公司和上海电气集团联合成立了钠硫电池储能技术有限公司，发展势头迅猛，成为世界上第二大钠硫电池生产企业。

固体电解质材料对于高温钠电池的功率密度、长期稳定性和安全性有着重要且基础性的影响，相关研究集中在β/β″-Al_2O_3 陶瓷、NASICON 型陶瓷、玻璃和玻璃陶瓷等 4 种[26]。β/β″-Al_2O_3 陶瓷由于具有高的离子电导率和高的物理化学稳定性，成为实用化高温钠电池普遍选用的固体电解质材料，也是高温钠电池的核心材料，关键技术由日本掌握。

3）液流电池

全钒液流电池是研究最为成熟的一类液流电池体系，主要通过钒离子价态变化实现化学能和电能的相互转变[27]。其中正极电对为 VO^{2+}/VO^{2+}，负极电对为 V^{2+}/V^{3+}，硫酸为支持电解质，水为溶剂，电池开路电压为 1.25 V。考虑到金属钒的价格波动问题，锌基液流电池由于资源广泛、价格低廉、能量密度高等优势，近年来在规模储能领域备受关注。其中，锌/溴液流电池的工作电压为 1.6 V，理论能量密度为 419 Wh/kg。如何抑制 Br_2 穿透隔膜以及锌离子在沉积过程中形成金属锌枝晶的问题，是推进锌/溴液流电池应用开发的关键。产业化方面，日本住友电工已经开展了 30 余年的研究，于 2015 年底在日本北海道安平町的南早来变电站建造了一套目前世界最大规模的 15 MW/60 MWh 的全钒液流电池储能系统，对风力和光伏发电输出进行调节。中科院大连化物所张华民团队是国内最早开展锌溴液流电池储能技术研究与开发的单位之一，于 2017 年 11 月开发出国际上首套 5 kW/5 kWh 锌溴单液流电池储能示范系统并投入运行。

4）新概念电池

为了进一步降低二次电池的成本、提高其安全特性，近年来学者们开展了电化学储能新概念、新材料和新技术的探索，构建了一系列廉价绿色的新概念电池体系，为规模储能提供新的选择。在众多储能方案中，最具代表性的体系是钠离子电池、水溶液嵌入型电池、全固态电池以及液态金属电池。现阶段，这类新概念电池体系的研究大多还在实验室研究或者示范运行的阶段，能否真正实现产业化应用，还需要进一步深入研究，攻克相关技术难题。

钠元素资源丰富成本低廉，室温钠离子电池被认为是可以代替锂离子电池的下一代储能技术。发展具有较宽离子通道、良好的导电骨架且结构稳定的储钠材料，是构建高能量密度与长循环寿命的钠离子电池的关键。2021 年，宁德时代发布了第一代钠离子电池。该体系正极采用普鲁士白材料，负极采用具有独特孔隙结构的硬碳材料，电芯单体能量密度达到 160 $Wh \cdot kg^{-1}$。

水溶液电解质价格便宜、安全性好，更适合在注重成本与安全性的大规模储能领域应用[28-29]。近年来，为了进一步发展高电压、大容量的水溶液电池，学者们开展了基于嵌入反应构建“摇椅式”水溶液二次电池的探索。进一步通过适当的表面修饰或通过改变水分子的缔合状态可以大幅提高水的分解电压，从而提升水系离子嵌入型电池的工作电压。全固态化是提升现有高能量密度二次电池安全性的一种共性技术。以热稳定性无机固体电解质替代可燃性有机液体电解液构建全固态电池，则可有效提升电池体系的安全性能。研发电导率高、化学稳定性好且电化学窗口宽的固体电解质，是构建新一代兼具高能量密度和长寿命的全固态电池的关键

液态金属电池是一类最新提出的全液态电化学储能技术，负极采用低电势的碱金属(锂、钠等)或碱土金属(镁、钙等)，正极采用较高电势的金属单质或者合金(锡、锑、铅及其合金)，电解质为含卤素的无机熔盐[30]。在 300~700 ℃温度下，正负极与电解质均为液态，因密度不同而自动分层。相对于传统的固态电池，液态金属电池这一特殊结构赋予其快速的液−液界面动力学性质、更高的循环稳定性以及安全特性，在固定化、大规模储能领域极具竞争力。如何降低液态金属电池的运行温度，提高电池体系的电压，是现阶段液态金属电池发展的重点方向。

2.5.2　关键科学问题与重点发展方向

储能材料的研究需着重解决电极微结构与反应性质、界面修饰与功能调控，多尺度电荷输运特性以及安全控制机理等方面的关键科学问题。主要包括：(1)通过电极微纳尺度的构筑，使活性组分固定化并充分利用，改善离子传输动力学特性；(2)构建稳定界面，控制界面微结构的演变与动态自修复，实现高效率充放电；(3)电化学模拟多尺度复杂输运特性，解析空间尺度的各相动力学参数；(4)从内部电池反应到外部系统安全性，建立自发的、可靠的安全性控制机制。

储能材料的重点发展方向如下：(1)开发基于能量型与功率型的第三代锂离子电池，发展热失控防范新机制与新技术；(2)进一步提升电池的低温性能与制造便利性，开发高温钠电池规模化制造及与之配套的先进制造装备；(3)发展以锌镍、锌溴液流电池技术为代表的能量密度较高的水系锌基液流电池体系；(4)探索新型水溶液电池材料体系，提升水溶液电池的工作电压；基于人工智能材料基因组与机器学习的高性能固态电解质设计与开发；进一步降低液态金属电池运行温度，开发低成本钠基液态金属电池新体系。

3　材料研究方法

电工材料的研究主要从材料设计、材料合成、材料改性和材料表征 4 个方面展开。

在材料设计方面，主流思路是通过构建复合材料实现协同强化作用。例如，通过在铜基体中引入均匀分布、纳米级、具有良好热稳定性的氧化物或其他颗粒(Al_2O_3、ZrO_2、SiO_2、Y_2O_3、ThO_2、TiB_2、SiC、AlN、Si_3N_4 等)等，所制得的弥散强化铜具有组织稳定、无相变、抗拉强度高、常温硬度高、高温抗蠕变性能好、热/电传导率高、疲劳性能和耐磨性能好等诸多优点[31]。材料基因工程的兴起也为材料研发提供了崭新的模式。它利用高通量实验和材料数据库，结合高通量计算，可加速新材料的设计和研发，降低开发成本[32]。例如，美国国防部空军研究实验室的科研人员成功研发了一种自动化系统，可以实现材料创建、材料属性测试、结果评估以及执行下一个最佳实验等功能。通过将过程模拟与机械分析相结合，以更低的成本、在更短的周期内设计出新型飞机部件。

材料合成方面，发展简单、高效、可控性强的材料制备方式，是实现低成本、高参数的先进电工材料的关键。例如，碳化硅衬底的价格高昂，制备大尺寸、低缺陷碳化硅衬底是发展宽禁带半导体器件的关键。现阶段碳化硅单晶合成的主要方式是物理气相传输法，但是生长过程难以控制缺陷含量，如何发展新型生长方法，如溶液生长法，获得大直径高质量碳化硅单晶是重点研究方向。磁性材料方面，当磁性材料的厚度降低为原厚度的 1/10 时，其涡流损耗将降低为原涡流损耗的 1/100。电化学磁性超薄带技术可以利用电场作用下溶液中相关离子

在阴极表面进行的电化学还原反应，使原子沉积在电极表面制备磁性超薄膜材料(厚度 8~100 μm)，对于开发磁性超薄带具有重要意义[33]。

在材料改性方面，纳米化与界面改性可以有效提高材料的强度、导电、导热等性能，是材料改性的主流方法。以储能材料为例，纳米化可以增加材料的比表面积，提高材料与电解液的接触面积，缩短离子的扩散路径，减小极化；界面修饰有助于释放电极在充放电过程中产生的应力，抑制电极结构的坍塌，保证电极的循环稳定性。在界面修饰方面，在铜基底表面修饰石墨烯等增强相，可以实现电子迁移率与电荷密度的提升。中国科学院兰州化学物理研究所研究团队设计了一种片状 TiO_2/C 复合材料，用作钠离子电容器的高性能负极材料，表现出优异的倍率性能和循环稳定性。其制备的钠离子电容器具有高达 142.7 $Wh\cdot kg^{-1}$、25 $kW\cdot kg^{-1}$ 的能量密度和功率密度，循环 10 000 圈后容量保持率可以达到 90%[34]。

先进材料表征技术可以探测材料从微观到原子、分子尺度的形貌、结构、成分和化学价态，为新型材料的制备与研究提供重要工具。例如，利用太赫兹技术可以无损探测非极性、非金属材料的内部缺陷；原位光谱学手段可以检测电池充放电过程中电极材料的结构演变规律，为电池反应机理的研究提供重要参考；原子力显微镜能以纳米级分辨率获得材料的表面形貌、粗糙度等信息，极大地推动了纳米科技的发展。同步辐射测试是近年来发展起来的一种重要的现代表征技术，可以得到原子的价态、对称性、轨道占据以及周围配位原子的种类、配位数等各种信息，是研究原子配位环境的重要分析手段。

4 总结与展望

近年来，先进电工材料的研究已得到了国内外学者、专家的高度重视。我们研究团队于 2015 年向中国科学院学部技术科学部提出开展先进电工材料学科发展战略研究的建议，并获批立项。国家电网公司也成立了“先进电工材料”研究专题。在前期研究基础上，2018 年 11 月，国家自然科学基金委员会–中国科学院学科发展战略研究工作联合小组第七次会议批准了“先进电工材料发展战略”项目。研究团队一百余人，经过 8 年的研究，出版了中国学科发展战略丛书《先进电工材料》。

然而，不得不承认的事实是，由于历史的原因，现阶段我国在电工材料的基础与应用方面的研究与西方发达国家还存在较大的差距。如何迎头赶上，需要国家从政策层面进行统筹规划，促进我国电工材料向坚实、创新的方向发展，提出如下具体建议：

1）在基础研究方面，以国家重大需求为牵引，形成从原材料到工艺设计到产品的整个价值链项目规划。同时，建议科学技术部在国家重大基础研究与发展规划中开辟电工材料专项，加强对科学前沿研究、基础理论创新研究以及极端电磁参数电工材料的重要基础设施项目的资助。

2）在学科建设与人才培养方面，设置一批以电工材料为基础的二级学科和交叉性学科，培养和增设相关国家重点学科，优化与完善相关专业课程体系与培养方案。增设电工材料类二级学科硕士和博士授予点，加大研究生培养力度。培养选拔一批学术功底深厚的科学领军人才及兼具理论知识和专业技术的工程专家，培养一支梯度合理、学科方向齐全的高水平人才队伍。

3）在政策层面，建立电工材料领域的“产学研用联盟”，并在联盟中发挥政府机构的政策引导作用。充分发挥行业协会与产业联盟的桥梁与纽带作用，实现电工材料和器件产业的可持续发展；制定电工材料的相关国家和行业标准，推进和完善标准体系建设，引导和支撑电工材料产业的健康发展。

总而言之，我们需要聚焦于电工材料的“原始创新”，在基础研究方面缩小我国与西方发达国家的差距，推进电工材料产业的结构调整与技术升级，实现电工材料研发与生产关键装备国产化的重点突破，以及高性能和高附加值材料产品的绿色高效低碳生产。同时，立足国内，加强国际合作，有效利用国际资源，为交叉学科建立宽松的研究环境与合理的评价机制，进一步促进电工材料的快速蓬勃发展。

参考文献 References

[1] 张 迪，耿建成，赵 武. 电气工程自动化现状及未来发展趋势[J]. 电气传动自动化，2021，43(2)：61-63，15.
ZHANG Di, GENG Jiancheng, ZHAO Wu. Status quo and future development trend of electrical engineering automation[J]. Electric Drive Automation, 2021, 43(2): 61-63, 15.

[2] ZUO X W, GUO R, ZHAO C C, et al. Microstructure and properties of Cu-6wt%Ag composite thermomechanical-processed after directionally solidifying with magnetic field[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 676: 46-53.

[3] ISLAMGALIEV R K, NESTEROV K M, BOURGON J, et al. Nanostructured Cu-Cr alloy with high strength and electrical conductivity[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(19): 194301.

[4] XU G, ZHAO J N, LI S, et al. Continuous electrodeposition for light-

weight, highly conducting and strong carbon nanotube-copper composite fibers[J]. Nanoscale, 2011, 3(10): 4215-4219.
[5] 梁　栋，邓蜀平，蒋云峰，等. 碳纤维复合芯电缆国内外技术研发现状及工程应用进展[J]. 化工新型材料，2011，39(增刊)：13-17.
LIANG Dong, DENG Shuping, JIANG Yunfeng, et al. Situation of technology research and engineering application for aluminum conductor composite core reinforced cable[J]. New Chemical Materials, 2011, 39(Supplement): 13-17.
[6] 胡建红，陈敬超，李　强，等. 电力机车用滑动集电材料的研究及其选用[J]. 电工材料，2004(1)：38-42.
HU Jianhong, CHEN Jingchao, LI Qiang, et al. Select and study on sliding-collecting-current materials in electric locomotive[J]. Electrical Engineering Materials, 2004(1): 38-42.
[7] WANG S H, CHEN P X, LI H, et al. Improved DC performance of crosslinked polyethylene insulation depending on a higher purity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1809-1817.
[8] 凡　朋，周登波，严海健，等. 纳米二氧化硅掺杂低密度聚乙烯微观特性的分子模拟[J]. 高电压技术，2017，43(9)：2875-2880.
FAN Peng, ZHOU Dengbo, YAN Haijian, et al. Microcosmic properties of LDPE/SiO_2 nano-composite by molecular simulation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 2875-2880.
[9] WANG X, NELSON J K, SCHADLER L S, et al. Mechanisms leading to nonlinear electrical response of a nano p-SiC/silicone rubber composite[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(6): 1687-1696.
[10] YANG Y, HE J L, LI Q, at el. Self-healing of electrical damage in polymers using superparamagnetic nanoparticles[J]. Nature Nanotechnology, 2019, 14(2): 151-155.
[11] KATZ M, THEIS R J. New high temperature polyimide insulation for partial discharge resistance in harsh environments[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(4): 24-30.
[12] KUMAGAI S, YOSHIMURA N. Tracking and erosion of HTV silicone rubber and suppression mechanism of ATH[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(2): 203-211.
[13] 何金良，彭　琳，周　垚. 环保型高压直流电缆绝缘材料研究进展[J]. 高电压技术，2017，43(2)：337-343.
HE Jinliang, PENG Lin, ZHOU Yao. Research progress of environment-friendly HVDC power cable insulation materials[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 337-345.
[14] SCHRECK M, GSELL S, BRESCIA R, et al. Ion bombardment induced buried lateral growth: the key mechanism for the synthesis of single crystal diamond wafers[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 44462.
[15] YAMADA H, CHAYAHARA A, MOKUNO Y, et al. Uniform growth and repeatable fabrication of inch-sized wafers of a single-crystal diamond[J]. Diamond and Related Materials, 2013, 33: 27-31.
[16] WANG Q K, LEI D, HE G D, et al. Characterization of 60 mm AlN single crystal wafers grown by the physical vapor transport method[J]. Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science, 2019, 216(16): 1900118.
[17] 杨庆新，李永建. 先进电工磁性材料特性与应用发展研究综述[J]. 电工技术学报，2016，31(20)：1-12.
YANG Qingxin, LI Yongjian. Characteristics and developments of advanced magnetic materials in electrical engineering: a review[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 1-12.
[18] YE F, LIANG Y F, WANG Y L, et al. Fe-6.5wt. %Si high silicon steel sheets produced by cold rolling[J]. Materials Science Forum, 2010, 638/642: 1428-1433.
[19] TAKENAKA K, SETYAWAN A D, ZHANG Y, et al. Production of nanocrystalline (Fe, Co)-Si-B-P-Cu alloy with excellent soft magnetic properties for commercial application[J]. Materials Transactions, 2015, 56(3): 372-376.
[20] FUJITA A, GOTOH S. Temperature dependence of core loss in Co-substituted MnZn ferrites[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(10): 7477-7479.
[21] 殷　毅. 稀土超磁致伸缩材料及其应用研究现状[J]. 磁性材料及器件，2018，49(3)：57-60.
YIN Yi. Research status on rare earth giant magnetostrictive materials and their applications[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2018, 49(3): 57-60.
[22] 李一宁，张培林，何忠波，等. 超磁致伸缩致动器的等效电路模型研究及实验分析[J]. 中国电机工程学报，2018，38(11)：3375-3383.
LI Yining, ZHANG Peilin, HE Zhongbo, et al. Research and experimental analysis on equivalent circuit models for giant magnetostrictive actuators[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3375-3383.
[23] CHEN L, FAN X L, HU E Y, et al. Achieving high energy density through increasing the output voltage: a highly reversible 5.3 V battery[J]. Chem, 2019, 5(4): 896-912.
[24] WANG J H, YAMADA Y, SODEYAMA K, et al. Superconcentrated electrolytes for a high-voltage lithium-ion battery[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 12032.
[25] ZENG Z Q, MURUGESAN V, HAN K S, et al. Non-flammable electrolytes with high salt-to-solvent ratios for Li-ion and Li-metal batteries[J]. Nature Energy, 2018, 3(8): 674-681.
[26] 孙　文，王培红. 钠硫电池的应用现状与发展[J]. 上海节能，2015(2)：85-89.
SUN Wen, WANG Peihong. Application and development of sodium sulfur battery[J]. Shanghai Energy Conservation, 2015(2): 85-89.
[27] AARON D S, LIU Q, TANG Z, et al. Dramatic performance gains in vanadium redox flow batteries through modified cell architecture[J]. Journal of Power Sources, 2012, 206: 450-453.
[28] YANG C Y, CHEN J, JI X, et al. Aqueous Li-ion battery enabled by halogen conversion-intercalation chemistry in graphite[J]. Nature, 2019, 569(7755): 245-250.
[29] SUO L M, OH D, LIN Y X, et al. How solid-electrolyte interphase forms in aqueous electrolytes[J]. Journal of the American Chemical Society, 2017, 139(51): 18670-18680.
[30] WANG K L, JIANG K, CHUNG B, et al. Lithium-antimony-lead liquid metal battery for grid-level energy storage[J]. Nature, 2014, 514(7522): 348-350.
[31] SCHROTH J G, FRANETOVIC V. Mechanical alloying for heat-resistant copper alloys[J]. JOM, 1989, 41(1): 37-39.
[32] URBAN A, MATTS I, ABDELLAHI A, et al. Computational design and preparation of cation-disordered oxides for high-energy-density Li-ion batteries[J]. Advanced Energy Materials, 2016, 6(15): 1600488.
[33] MYUNG N V, NOBE K. Electrodeposited iron group thin-film alloys: structure-property relationships[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2001, 148(3): C136.
[34] LI H X, LANG J W, LEI S L, et al. A high-performance sodiumion hybrid capacitor constructed by metal-organic framework-derived anode and cathode materials[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(30): 1800757.



程时杰
1945—，男，博士，教授，博导，中国科学院院士
主要从事电力系统自动化与电力储能的研究，率先在国内倡导并积极推进电工材料以及储能技术在电力系统中的应用研究
E-mail: sjcheng@hust.edu.cn

CHENG Shijie
Ph.D., Professor
CAS member



周　敏(通信作者)
1987—，女，博士，副教授
主要从事面向电力应用的规模储能材料与技术等方向的研究
E-mail: minzhou0729@mail.hust.edu.cn

ZHOU Min
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2023-06-28　修回日期　2023-08-03　　编辑　程子丰