

材料科学与工程领域的技术革新与发展

林授权

海河检测技术（天津）有限公司 天津 300000

摘要：材料是工业制造、新兴产业发展的基础支撑，材料工艺水平直接决定装备服役性能、产业发展上限。本文结合材料检测、产业化实操视角，梳理近现代材料学科三轮发展迭代历程，从基础基材研发、制备表征工艺两大维度，梳理当下材料核心技术革新成果，结合新能源、高端制造、生物医药三大民用赛道，剖析新材料落地应用实况。立足行业一线生产现状，总结原料设备、中试转化、行业标准三类发展瓶颈，结合国内双碳管控、学科跨界发展态势，预判绿色循环、智能功能、交叉赋能三大发展方向，贴合国内新材料国产化落地需求，为行业工艺优化、技术落地提供实操参考。

关键词：材料科学与工程；技术革新；功能材料；产业化应用；行业发展

引言：伴随国内高端制造、新能源产业提速，传统材料性能短板逐步凸显，行业技术革新节奏持续加快。现阶段国内材料研发逐步从仿制改性转向自主创新，制备、检测一体化技术逐步普及，但产业化落地仍存在诸多现实阻碍。基于海河检测行业一线工作经验，结合材料研发、试样检测、量产核验全流程工作，梳理行业技术迭代规律，剖析现存发展痛点，研判行业后续发展走向，明晰国内材料行业革新发展路径。

1 近现代材料科学与工程迭代历程及阶段性技术特征

近现代材料科学依托冶金、化工、物理学科技术赋能，历经三轮技术迭代，完成从经验制备到机理可控研发的转型，各阶段技术体系、应用场景、研发逻辑差异化特征显著。（1）传统结构材料工业化成型阶段（19世纪中后期—20世纪中期）。该阶段服务基建与重工业发展，依托传统冶金、烧结、熔炼工艺，主打钢铁、水泥、普通陶瓷、通用高分子四大基础材料。核心技术为调配熔炼配比、优化热加工工艺，依托宏观调控提升材料力学性能，研发依靠经验试错，材料功能单一，仅具备承重、防护结构性能，生产工艺粗放、能耗较高，适配工业化基础设施建设用材需求。（2）功能材料精细化研发阶段（20世纪60年代—21世纪初）。电子信息、航天产业推动材料研发转型，行业从力学性能研发转向电学、光学、磁学专项性能开发，硅基半导体、压电陶瓷、超导合金实现量产突破。依托金相微观检测技术，实现材料组分精准调控，建立成分-结构-性能关联研发体系，摆脱纯经验研发模式，高端专用材料实现实验室量产，但生产成本偏高，民用规模化落地难度较大。（3）复合智能材料跨界革新阶段（2015年至今）。依托多学科交叉技术打破单一材质性能局限，金属基、树脂基复合材

料实现量产，自修复、自适应智能材料进入工程试用阶段。行业实现微观结构可控制备、材料性能定向调控，产品兼具轻量化、耐腐蚀特性，适配新能源、高端装备极端工况，研发依托工业实测数据，兼顾性能优化与低碳生产，成为现阶段材料革新主流方向^[1]。

2 材料科学核心板块技术革新体系与产业化赋能发展

2.1 前沿基础材料领域核心技术革新成果

国内基础材料研发摒弃粗放改性工艺，聚焦微观组分调控、制备工艺迭代，补齐高端基材国产化短板，核心革新集中三类材料。（1）低维纳米材料制备工艺迭代。传统气相、液相合成工艺存在粉体团聚、粒径不均、批次稳定性差问题，行业优化等离子体原位合成工艺，精准把控二维氮化硼、纳米碳片层尺寸，调控反应腔体温压参数，省去后期筛分工序，降低材料内部缺陷，适配半导体、防腐涂层原料生产。（2）无机复合基材界面改性升级。针对航空重工金属基、陶瓷基复合材料，淘汰粘接复合工艺，采用原位烧结熔合技术，优化陶瓷增强相掺杂比例，改善异质材料界面应力问题，提升复合构件结合强度，适配高温、高载荷极端工况使用。（3）功能性高分子聚合工艺优化。针对耐候、可降解特种高分子，更换生物基低成本催化剂，重构高分子链段结构，无需外加助剂即可提升材料耐水解、抗老化性能，降低聚合生产能耗，完成通用高分子向专用功能高分子工艺升级。

2.2 制备表征一体化技术革新赋能材料产业升级

以往材料制备与检测相互割裂，拉长研发周期、降低成品合格率，当下一体化工艺与检测设备落地，打通成型、表征、参数调试全流程。（1）一体化增材成型工艺改良。优化激光熔融、熔融沉积设备光路与送料系

统,匹配金属、高分子专用耗材,调控铺层厚度与扫描速率,实现异形构件一次成型,减少热处理、打磨二次加工工序,适配小众构件定制化生产。(2)原位同步表征技术应用。联用透射电镜与成型设备,改变离线抽样检测模式,实时观测材料烧结晶粒演变、微裂纹萌生过程,现场修正工艺参数,减少试样报废量,提升量产成品率。(3)高通量数字化研发落地。搭建本土化工业材料数据库,依托原料物性参数算法匹配制备方案,替代传统人工试错实验,快速核定材料配比工艺,缩短新材料研发周期,贴合中小材料企业量产研发节奏^[2]。

3 重点应用赛道材料技术革新落地应用现状

3.1 新能源领域储能、光电转换材料技术革新

现阶段新能源用材革新聚焦配方改性、工艺降本、稳定性优化,全部符合国内储能电站、光伏厂区量产落地标准,淘汰早期缺陷材质,技术迭代以适配规模化工况为核心。(1)电化学储能主材工艺迭代落地。磷酸铁锂正极采用气流分级耦合静电分选工艺,严控粉体粒径偏差,优化烧结保温时长,降低电池充放电颗粒碎裂概率,目前适配国内大中型电网储能项目量产;钠离子电池硬碳负极改良碳化热解工艺,依托本土钠矿原料适配生产,规避锂资源供应链限制,现阶段低速新能源车、户用储能箱体已批量搭载;非氟离子隔膜完成产业化试制,替代传统全氟隔膜,简化流延制备工序,适配长时液流电池成套储能设备。(2)光电转换基材迭代应用。晶硅光伏材料改良钝化镀膜工艺,减小电池片表面缺陷点位,量产P型晶硅组件完成全面迭代;钙钛矿复合光电材料优化界面自组装改性工艺,解决层间脱落、光照衰减问题,双面叠层钙钛矿组件进入厂区试点铺设;光伏背板改用耐候改性高分子基材,调整无机填料掺杂配比,适配户外高低温交变野外电站使用,替代老旧易开裂复合型背板材料。

3.2 高端制造领域耐高温、轻量化结构材料迭代

高端装备用材围绕极端温度、载荷工况迭代,国产自研合金、复合结构材料实现自主量产装机,逐步替代进口用材,工艺适配航空、轨道交通、高端机床加工标准。(1)耐高温金属结构材料国产化迭代。国产DD6第二代镍基单晶高温合金实现批量铸造成型,可长期耐受1500℃高温工况,优化晶体定向生长工艺,减少叶片内部微孔隙缺陷,已批量装配民用航空、军用航发涡轮叶片;粉末冶金高温合金改良真空雾化制粉工艺,提升合金粉体纯净度,严控粉体杂质含量,成型大尺寸航空发动机涡轮盘构件,实现高端动力结构件全流程自主制备。(2)轻量化复合结构材料量产应用。陶瓷颗粒增强

钛基复合材料优化界面烧结工艺,弱化异质材料界面应力,同等工况下相较传统钛合金减重超四成,用于飞行器机身附属承重构件;连续碳纤维改性树脂基复合材料改良模压固化工艺,降低板材分层缺陷率,批量用于轨道交通车体、数控机床外壳结构件,兼顾自重控制与抗冲击性能。

3.3 生物医药领域仿生、抗菌医用新材料研发应用

医用材料革新严守生物相容性国标,依托天然基材改性、微观仿生结构复刻技术,区分临床量产、临床试验两类应用层级,严控材料溶出、细胞毒性指标。(1)仿生医用基质材料临床落地。复刻人体细胞外基质微观结构,研发蜗牛糖胺聚糖交联仿生凝胶材料,模拟人体皮肤胶原排布结构,适配糖尿病足慢性创面敷料使用,材料可贴合创面形变,适配人体软组织生长肌理;仿生牙釉质修复材料复刻牙齿微晶排布结构,调整无机矿物聚合比例,用于口腔牙体缺损修补,贴合原生牙体耐磨、耐酸碱理化属性。(2)广谱抗菌医用功能材料产业化应用。锌锰氧化物仿生棘刺抗菌材料依托物理微观结构破壁抑菌,无抗生素添加,雾化剂型医用耗材已进入院内试点;蜂源纳米抗菌水凝胶优化交联聚合工艺,调节凝胶孔隙率,用于浅表感染伤口包扎,适配院内常规创面护理;无机银掺杂改性植入钛材,优化表面喷砂阳极氧化工艺,在骨科植入钉表层构筑稳定抗菌膜层,降低术后植入部位菌群附着概率,目前多款改性植入材料已取得二类医疗器械量产资质^[3]。

4 现阶段材料科学技术革新面临的瓶颈与制约因素

当前材料技术革新并非单纯工艺短板,而是设备、产业化、行业体系多重因素叠加受限,制约高端材料自主迭代。(1)核心设备与高纯原料国产化不足。高端原位表征设备、单晶熔炼炉、MOCVD薄膜制备设备核心部件依赖进口,设备温控、真空精度难以达标;高纯特种助剂、高纯金属前驱体、高端隔膜基材自给率偏低,本土原料杂质含量偏高,直接造成高端材料批次性能不稳定,实验室成果无法复刻量产。(2)材料中试量产衔接存在断层。多数改性新材料仅完成实验室小试样制备,国内专业化中试平台覆盖率不足,异质材料界面调控、规模化烧结工艺适配性差,小试优良配方放大生产后,易出现开裂、力学性能衰减、耐候性下降问题,量产调试成本居高不下。(3)行业配套体系与技术适配性不足。细分新材料行业服役标准、检测规范滞后于技术迭代,新能源、医用新材料跨领域核验流程繁琐;同时材料研发、仿真、工艺复合型人才缺口较大,材料物性仿真软件、高通量设计平台仍依托国外系统,外加绿色低

碳生产管控趋严,高耗能传统材料技改难度提升,进一步放缓技术革新落地速度^[4]。

5 材料科学与工程领域未来革新方向与发展趋势

5.1 低碳绿色循环材料成为主流研发方向

依托国内双碳产业管控要求,研发重心聚焦工艺降碳、材质可回收两大维度。(1)原生制备低碳工艺常态化迭代。优化冶金烧结、高分子聚合高温反应流程,采用电热耦合低温合成技术,替代传统燃煤高温制备工艺,降低特种合金、通用高分子材料生产碳排放;改良矿物提纯工艺,减少酸碱助剂使用量,适配建材、金属基材绿色生产标准。(2)全生命周期循环材料规模化研发。研发可无损拆解、闭环再生改性复合材料,优化界面可逆粘接结构,实现风电碳纤维板材、车用铝合金构件废旧料直接回炉复用;深耕生物基可降解基材研发,依托植物纤维、微生物代谢原料合成高分子材料,优化酶降解路径,适配民用包装、医用耗材一次性用材迭代需求。

5.2 智能响应、自修复功能材料技术深度研发

智能材料告别粗放传感改性,转向微观结构自主调控研发,适配装备长周期服役、免维护工况,研发聚焦结构改性、触发机制优化。(1)环境响应型功能材料精细化改性。优化温敏、力敏、酸碱敏微观孔道结构,调整填料掺杂比例,提升材料外界信号感知精度,改良光电传感、防腐涂层专用智能基材响应速率,适配户外装备、化工储罐防护用材升级。(2)本征型自修复材料工程化攻关。依托微胶囊包覆、动态共价键重构技术,优化修复剂封存配比,解决外力破损后修复时效慢、修复强度不足问题,重点攻关混凝土路面、航空密封胶、管道防腐自修复材料,推进实验室配方适配户外复杂工况,降低后期运维修补频次。

5.3 多学科交叉融合驱动颠覆性材料技术诞生

单一材料学科研发已难以突破性能上限,物理、生物、人工智能、化工多学科跨界融合,成为颠覆性新材

料技术突破核心路径。(1)数理工科跨界赋能材料定向研发。结合算力仿真、晶体物理理论,搭建本土化材料物性数据库,依托算法预判晶体生长、组分适配规律,替代传统试错实验,定向研发二维半导体、超低损耗光电新材料,突破国外材料配方壁垒。(2)生物与材料学科融合开辟新赛道。结合合成生物学、人体组织学机理,复刻天然生物矿物、人体组织微观结构,研发仿生矿化结构材料、活体医用植入材料;联动机械工程学,适配增材制造专属耗材定制研发,实现材料结构、成型工艺一体化同步开发,催生全新品类工程用材^[5]。

结束语:近现代材料行业完成从经验制备到可控研发的转型,各类前沿材料技术已逐步落地细分应用领域,制备表征一体化技术有效提升研发量产效率。但高端原料设备受制、中试衔接断层、行业标准滞后问题,依旧制约行业自主发展。后续行业需立足产业实际,深耕低碳循环材料、智能功能材料研发,依托多学科交叉补齐技术短板,完善产学研及检测核验配套体系,稳步突破国外技术壁垒,推动国内材料科学技术实现自主、稳健、产业化长效发展。

参考文献

- [1]王毅,李金山,杨明理,向勇,薛德祯,刘建军,宿彦京,谢建新.面向新材料产业的材料基因工程发展研究[J].中国工程科学,2026,28(2):147-158.
- [2]王毅,李高楠,刘哲,高兴誉,王洪强,宋海峰,杨明理,宿彦京,MargulanIbraimov,李金山.材料基因工程与智能科学:AI+时代无尽前沿[J].科技导报,2025,43(12):93-109.
- [3]张俊凯,李维娟,庞启航,张大征.“双碳”背景下材料科学与工程专业人才培养改革探索[J].化工管理,2025(4):39-42.
- [4]王轩,李帅杰,仪哲甫.量化指标在材料科学与工程毕业设计评价体系中的角色[J].化工管理,2025(8):51-54.
- [5]叶飞,刘玮书.材料科学与工程基础教材建设的思考与实践[J].中国教育技术装备,2025(23):63-66+77.