

中国热处理 2035 发展纲要

(中国机械工程学会热处理分会)

编者按:中国工程院咨询项目《中国热处理与表层改性技术路线图》以相变、应变-硬化和“无应力集中”抗疲劳概念为理论基础,聚焦表层硬化技术体系与产业、真空热处理技术体系与产业、特大型关键构件等 13 个领域,发布 10 年来,引领了热处理学科及行业发展。党的二十届三中全会进一步明确了到 2035 年我国全面深化改革总目标,需要大力推进技术创新和产业升级,提高制造业的核心竞争力。为此,中国机械工程学会热处理分会围绕热处理“绿色、智能、精密、高端”的发展方向,聚焦热处理先进技术研究 and 学科前沿,提出了“中国热处理 2035 发展纲要”,为助力我国高端装备的发展提供支撑。

热处理是采用适当的方式对金属材料或工件进行加热、保温和冷却以获得预期的组织与性能的工艺,其通过调节和控制多层次微观结构与组织形态,赋予了金属材料不同的性能。热处理主导了航空航天、国防军工、轨道交通、新能源装备、汽车载具、矿山机械、石油化工、海洋船舶等高端装备关键基础件的性能调控,是先进制造不可或缺的基础环节,其水平直接决定了高性能材料与高端装备关键零件的性能、寿命和可靠性。因此,热处理也是先进材料和高端装备制造的核心技术,成为了现代工业的重要基础,属于国家核心竞争力。聚焦高端制造业高质量发展需求,热处理作为发展新质生产力的根本技术之一,为更好地支撑制造业向高端化、智能化、绿色化发展,特制定了本发展纲要。

1 发展现状及技术需求

2013 年,在中国工程院多位院士的领导和直接参与下,中国机械工程学会热处理分会举全行业之力,编制并发布了《中国热处理与表层改性技术路线图》。《路线图》聚焦 13 个关键领域和 8 个材料专题,引领了热处理学科及行业发展,推动我国热处理技术在各领域发挥了显著的作用。

基础理论取得了重要突破。创建了抗疲劳制造新理论,形成精密热处理、表层强化韧化、高精度低损伤加工与残余应力调控等系列关键技术,改性的航空主轴接触疲劳寿命超过国外同类产品。阐明了大型锻件混晶及晶粒粗大微观机理,形成了消除大锻件组织遗传与晶粒细化/均匀化工艺技术,支撑了核电、火电等高端装备的核心大型构件自主可控制造。创建了钛合金激光增材制造及热处理组织调控理论和技术,疲劳极限提高 67%,助力了重大装备 LAM 钛合金大型关键构件的自主制造。提出了“多相、亚稳和多尺度”的 M³组织与性能调控理论,开发了典型的第三代高强

度高韧塑性汽车钢,促进和带动了高性能汽车钢的产钢和用钢全产业链的技术进步。揭示了有色金属深冷处理机理,在铝合金、铜合金、镁合金、钛合金等轻质高强构件获得了广泛应用,促进了航空产品的技术进步。

工艺技术创新能力持续提升。发明了热处理淬火过程紊流态流速的测量方法,创建了提升流速场均匀性的均流结构设计技术,提出了有效淬火冷却区的概念与评估方法,发展了基于数值模拟的水空双介质交替控时淬火工艺,解决了大型复杂形状合金钢件水淬开裂的技术难题,提升了我国舰船用中高速柴油机曲轴和 1000 MW 以上超超临界汽轮机缸体自主制造能力。真空渗碳技术正在逐步替代传统的气氛渗碳工艺,并在汽车零部件领域得到了广泛应用,创建了真空渗碳理论新模型,突破了板壳结构件精密控形控性关键技术,发展了热处理近零畸变控制方法,实现了远程导弹固体发动机壳体、大直径火箭及星船舱体结构和高强装甲薄板等重点型号构件精密热处理。高组织性能均匀性和低污染的轴承部件等温淬火、分级淬火、马/贝复合组织热处理等新技术逐步取代传统油淬处理,纳米贝氏体轴承钢及其热处理研究不断深入。淬火-配分-回火工艺研究取得了进展,建立了预测残留奥氏体量和奥氏体中碳含量的工艺设计模型,实现了低碳、中碳和高碳碳素钢的强度和塑性同时增加。奥氏体不锈钢的低温离子渗氮、低温离子渗碳技术在工业和民用产品中得到了应用,促进了航天器蜗杆、核电控制长管、手机充电口、汽车增压器等产品技术进步。钛合金离子渗氮技术在航空航天领域逐步拓展至化工等民用领域,应用范围日趋广泛。开发了第二代齿轮、轴承钢渗碳渗氮的复合强化技术,硬度可达 68~70 HRC,服役温度可提升至 350℃ 以上。开发了时效硬化型渗氮齿轮的变温深层离子渗氮工艺,应用于制造高性能的高速重载齿轮。以数值模拟与人工智能为核心的热处理数字化与智能化取得显著进展,成功开发了

主要起草人员:徐跃明、刘正东、程晓农、任瑞铭、顾剑锋、闫牧夫、吴玉程、姚建华、朱文明、姜超、刘平、李俏、文超、曾爱群、陈乃录、卢金生、史有森、张立平、刘澄、徐光清、高直等,由文超执笔。

温度-组织-应力耦合的热处理数值模拟软件,大幅度提高模拟效率和精度,催生了创新的水空交替淬火技术,升级了传统的锻后余热淬火改进技术,应用于核电、火电、船舶等领域高端装备大型锻件的热处理工艺优化设计。

工艺装备设计制造技术取得突破。重要领域热处理工艺装备数控化率达到80%以上,30%以上的热处理企业实现生产管理信息化、热处理加工数字化,且热处理车间环保装备已普遍应用。热处理设备已形成了全系列的设计制造能力,可满足各种典型零件的热处理需求,通用热处理设备的技术接近国际先进水平,关键领域重大热处理装备取得突破,实现自主可控。研发了国内首台套超大构件移动式热处理联合机组,实现了火箭箭体结构壳段、固体发动机壳体等高强度/高强铝合金复杂薄壁大构件精准成形和性能调控。开发了多功能真空热处理工艺设计平台,建成模块化柔性真空热处理生产线,成功研制国内最大真空高压(单室压力达到15 bar、双室压力达到20 bar)气淬炉,解决了高端制造领域关键金属构件清洁热处理过程中组织/变形精密调控难题,已应用在大型模具、钛合金构件和航空航天关重件的性能调控。突破了多软件协同交互流固耦合计算中数据传递和效率低下的瓶颈,开发的炉膛结构设计与优化技术应用于国产大型真空炉和箱式多用炉,装炉量达8 t的可控气氛多用炉投入了生产应用。通过对渗碳炉排出气氛的回收再利用,实现渗碳气氛减量30%以上,实现热处理行业的节能减排。离子热处理规模和设备拥有量已居世界首位,国产离子热处理设备已能满足绝大部分产品的质量要求,自主研发的辅助加热、热壁炉和高频逆变脉冲电源已经市场化,应用于高参数齿轮、核电装备、大型模具、不锈钢低温渗氮等方面。开发了无软带感应淬火、大型双头全齿廓感应淬火等成套设备,无软带感应淬火技术已应用于20 MW级风电主轴轴承、双头全齿廓感应淬火技术应用于4 m以上风电内齿圈。突破了热处理装备智能控制技术、在线远程监控与服务技术、设备故障诊断和维护技术,开发了包括生产排程系统、制造执行系统和企业资源管理系统等的集成软件,实现了对热处理生产全过程的信息化管理,包括订单管理、生产计划安排、物料管理、质量控制等各环节,建立了高度自动化和智能化生产热处理车间。

关键构件热处理核心技术不断突破。掌握了超大型感应淬火齿条残余应力控制和高效高精度热处理技术,解决了大型铸造齿条感应淬火裂纹难以避免的世界性技术难题,成功为三峡升船机生产出质量合格的齿条。研发了齿轮修形与热处理数值模拟的配合工

艺,解决了超高速复杂运行条件和高承载工况要求齿轮零件高质量一致性的难题,保障了时速350 km“复兴号”动车组齿轮传动系统持续稳定运行。攻克了高铁和盾构机用轴承热处理关键工艺技术,实现了装车应用和批量生产。开展了铝锂合金大型结构件成形与热处理匹配过程形性精确控制研究,支撑了第三代铝锂合金在运载火箭和月球着陆器贮箱上的应用。推进了多种合金多形态增材制造后热处理基础工艺研究,保障了高温合金、钛合金、合金钢等增材制造复杂构件在航天领域的应用。热作模具钢厚板轧后在线直接水淬工艺与装备在特殊钢企业广泛应用,节能效果明显。中碳合金钢汽车曲轴采用连续炉水淬生产线,实现了淬火件的性能提升、畸变量减小和介质对环境的零污染。

热处理基础理论、工艺技术、工艺装备的不断突破支撑了国家制造业的高质量发展。同时,热处理标准体系不断完善,在基础通用、热处理质量控制与检验、典型零件热处理、热处理设备等方面制修订重要国家、行业标准百余项,为关键构件的热处理质量提升提供了重要保证。

随着我国制造强国、交通强国、航天强国、航空强国等战略的深度实施和大力推进,为热处理产业的发展提供了新的需求,和难得的历史性机遇与挑战。一是我国航空航天、国防军工、轨道交通、新能源装备、汽车载具、矿山机械、石油化工、海洋船舶等重要领域具备巨大的市场规模,关键基础零件热处理的需求仍将保持稳定增长并向高端化发展。二是随着新一代信息技术、人工智能与热处理技术加速融合,智能技术、传感器和数据分析集成到热处理工艺中,为传统热处理向绿色化、高端化、精密化和智能化转型带来了重大机遇。同时,更多的行业将实现从跟跑、并跑向领跑转变,极端环境、极端工况等服役需求给热处理基础理论与技术带来了更多的挑战。

但是,我国热处理总体水平和国际先进水平相比仍有差距。在基础理论方面,金属材料热处理组织调控理论有待深入、金属材料增材制造过程相变理论有待完善、智能热处理理论框架有待搭建等。在工艺技术方面,绿色节能热处理工艺技术有待突破、智能热处理技术有待深化等。在工艺装备方面,数据库、工艺软件、专用传感器等工艺装备一体化基础技术有待提高,热处理装备的更新换代步伐还有待加快。在高端装备关键构件方面,“卡脖子”零件有待攻克、齿轮与轴承等关键基础件寿命有待提高、大型构件热处理质量还有待提升等。

同时,高端装备关键零部件质量的一致性、稳定性等问题的解决,需要全新的材料热处理理念。热处理质量在整个产品质量中具有基础性、特殊性、复杂性、系统性。热处理作为一个复杂的系统,其与材料、零件

特征、工艺、装备、过程控制、质量检验等有着密切的联系。目前,产品设计-材料-制造-应用全流程还存在信息孤岛,产品零件全生命周期对热处理组织和性能的影响系统研究较少。

为此,需在基础理论研究、先进工艺技术开发、高端装备研制、高性能关键构件质量提升等方面加大投入,充分利用人工智能等新兴技术,加快培育和发展热处理新质生产力,促进我国热处理技术与装备的高质量发展,支撑国家战略的有效实施。

2 发展目标

围绕热处理“绿色、智能、精密、高端”的发展方向,以服务国家重大需求为己任,面向国民经济主战场,聚焦热处理先进技术和学科前沿,突破高性能关键构件热处理技术,开展系统深入的基础理论研究、应用研究、关键技术攻关和热处理设备研发,支撑我国制造强国、交通强国、航天强国等战略的实施和建设,成为我国强国战略体系中的重要组成部分,为实现中国式现代化贡献力量。

到2035年,热处理高质量发展体系基本建成,工艺能力、装备水平和关键构件质量显著提升。其中,规模以上企业热处理数字化车间达到75%以上,热处理生产效率提升50%以上,热处理生产工艺减少能源消耗80%以上,热处理单位GDP温室气体排放下降65%以上,实现热处理件零畸变和质量零分散度、热处理生产零污染,关键构件疲劳寿命提高10~100倍。

基础理论研究更加深入。突破金属材料多相多尺度的组织与性能协同调控理论、增材制造本征热处理理论、热处理畸变全流程控制理论、面向极端环境与工况条件的零件组织设计与调控理论等。

工艺技术创新能力明显提升。开发具有高效性、高精度、高可靠性的绿色热处理工艺技术,突破热处理工艺、组织与性能的模拟和控制技术,形成材料、关键零件、热处理工艺装备一体化研究与设计,建成一批数字化、智能化热处理车间及创新平台,实现热处理过程碳排放及其他污染物排放的数字化管控。

装备自主化能力显著增强。热处理装备的数字化、智能化、绿色化达到国际先进水平。热处理炉温度均匀性及控制精度进一步提高,设备能效、可靠性、使用寿命达到国际先进水平。热处理装备用传感器、关键配件和辅助材料的质量进一步提升。

核心零部件性能与质量进一步提高。实现特大构件组织与残余应力分布的精准预测和调控。突破进口关键零部件国产化所需的热处理核心技术,提升国产化零部件性能与质量。

3 发展方向及主要任务

3.1 基础性和共性技术研究

开展金属材料热处理组织结构调控与性能研究,深入研究固态相变理论、多场耦合下原子迁移等理论和机理,开发特种材料精密热处理技术、大型薄壁结构形性精确控制技术、磁性/弹性/导电性功能材料热处理及性能调控技术、多元复合渗镀改性技术、高温合金表层改性技术、钛合金表面强化技术等。开展金属材料增材制造(3D打印)过程中特殊的凝固和循环非稳态固态相变基础研究,建立高能束增材制造和热处理共同作用下的控形控性理论。

开展高端装备关键构件热处理过程畸变控制共性技术研发,揭示热处理过程温度-相变-应力相互作用机理,建立加热过程蠕变和应力松弛本构关系、冷却过程耦合相变的热弹塑性力学模型。加强淬火冷却过程的组织、性能、应力与畸变预测软件的开发,开展冷却强度大范围精确可控的控制冷却技术、高效加热技术的研发,开展特大构件表面换热系数与相变模拟预测技术攻关。开发以合理组织性能和低畸变为驱动目标的热处理精密控制技术,建立热处理畸变全流程控制的理论和方法。

加强构建热处理过程与典型金属构件的设计、研发、制造和应用全生命周期之间的关系,发展“设计-材料-制造-应用”一体化中热处理调控技术,开发全制造周期的热处理协同调控技术,开展典型构件热处理组织与应力的溯源和演化分析研究,研究典型关键零部件热处理残余应力调控和测试技术,形成基于热处理技术的全寿命周期评价技术。开展材料成分与热处理融合研究,准确揭示材料-热处理工艺-微观组织-性能之间的关联和定量关系,掌握关键基础零部件规模化精密热处理技术和典型关键零部件力学性能热处理调控方法,形成基于机器学习的“成分-工艺-性能”数据库,开发出高性能材料成分设计技术,深入研究基于材料成分设计下的先进热处理工艺。创新整体与表层复合热处理工艺,开展表层硬度梯度设计与控制工艺研究,建立组织梯度与性能梯度的内在关联,形成梯度硬化层承载能力与构件服役寿命的精准评价技术。

加强基于机理模型的热处理工艺仿真技术的深化研究,开发基于数据驱动的热处理工艺调控技术,加快发展基于大数据分析的热处理能耗控制技术。加强热处理过程的数字孪生与动态优化技术研究,突破热处理工艺开发多目标主动优化和实施过程的智能控制技术。

开展热处理质量在线动态管控技术,热处理生产能效优化调度技术和热处理基础工艺持续迭代优化技术的研究,强化热处理生产智能化管控关键核心技术攻

关,搭建智能热处理理论框架、数据库与自主学习平台。

围绕关键零部件高温、高速、重载等极端服役需求,针对齿轮、轴承等关键零件的寿命离散度大、尺寸稳定性差、微动磨损等突出问题,研究表面形变与细晶强化技术,揭示基体组织与残余应力状态对服役性能、尺寸稳定性与疲劳寿命的影响规律,形成具有综合力学性能的基体组织状态设计方法,研发材料-工艺-组织-性能协同调控的锻热一体化新工艺,开发新型扩渗与表面涂层复合强化技术,以满足长寿命高可靠性要求。

3.2 先进热处理工艺技术研发

围绕传统热处理工艺的升级换代需求,深化研究和推广 QPT 工艺、轴承钢分级淬火技术等,发展真空低压渗碳、高温渗碳、激光表面处理、真空离子渗氮、碳氮复合强化等先进表面改性工艺,开展基于新型设备的工艺再创新研究,突破渗层深度和材料性能无损检测技术。开展激光、感应以及其他高效热源热处理技术和激光复合热处理技术应用研究。研发功率输出稳定、可靠的大功率/超高频率的感应电源,突破多场耦合的感应热处理数值模拟技术。推广水-空交替控时淬火、高压气淬等技术应用。

围绕未来产业和材料的发展需求,开展复合材料、轻合金、高温合金、芯片用半导体材料等未来材料的先进热处理工艺技术研究,发展激光制造、纳米制造等未来制造相关热处理技术。

围绕关键构件性能提升需求,开展聚变堆和快堆用大锻件、新能源车用大型压铸模具热处理过程数值模拟、冷却调控技术研究。针对航空及特殊工况高温关键零件,探索并开展粉末高温钢热处理相关技术研究,研发热处理变形小、尺寸稳定性好且质量均一的高强韧零部件,突破 65 HRC 以上超高硬度精密热处理技术。

聚焦热处理高质量发展,建立热处理加工全流程的大数据集,开展基于大数据、人工智能技术的热处理数智化过程与生产管理系统研究,开发可视化、数字化、智能化的热处理过程与生产管理系统,形成热处理车间智能制造系统专用软件,推进热处理过程管理和生产管理数字化。开发热处理工艺、热处理过程的数智化软硬件平台,突破机理模型-数据驱动融合的创新热处理仿真技术,实现齿轮、轴承等典型零件热处理加工全流程的数字孪生、能耗与污染排放的数字化管控。建设热处理设备、热处理工艺、热处理企业的碳排放数据库,实现热处理碳排放核算,深化热处理减碳技术的研究。

3.3 绿色智能热处理装备制造

围绕热处理装备绿色发展要求,研发真空高压气淬工艺与装备成套技术,开展高压风量-风速分段调节

专栏 1 热处理技术创新工程

01 基础性和共性技术

1) 高强韧淬火关键技术研究。开展水淬状态下瞬态应力与马氏体强韧性变化对裂纹萌生的研究,提出表征启裂抗力和评价瞬态应力模拟准确性的方法,建立避免水淬开裂的临界条件和工艺设计准则。

2) 超大尺寸零件真空加热高压气淬冷却技术研究。开展超大尺寸模具真空加热高压气淬技术研究,建立超大尺寸模具热处理组织调控方法。

3) 真空状态下的碳氮共渗技术研究。开展真空碳氮共渗理论研究,揭示高温条件下氮原子渗入机理。

4) 组织与性能和残余应力、变形仿真技术。开展关键构件的组织、性能、残余应力、变形的精确仿真技术,构建热处理精确仿真所需数据库。

5) 真空渗碳软件开发。开展真空渗碳数学模型的研究,开发适应性强、精确度高的真空渗碳软件。

6) 特殊材料表面强化技术。开展钛合金、高温合金、复合材料等特种材料表面强化理论研究,形成特殊材料表面强化工艺技术。

7) 氦气冷却及回收利用技术。开展高压气淬中的氦气冷却控制技术,开发氦气回收利用技术。

8) 高碳钢的梯度淬火关键技术研究。开展高碳钢梯度淬火工艺研究,揭示该工艺条件下组织强韧性对裂纹演变和服役寿命的影响和失效机制。

9) 可控气氛减量化技术。开展可控气氛循环利用装备研发、炉气循环利用关键技术研究。

02 先进热处理工艺技术

1) 开展轴承钢表面强化成套技术、高硬度表面强化成套技术、新能源汽车用大型压铸模具强化技术等研究。

2) 建立基于知识挖掘的在线服务热处理专家系统,开发基于数据驱动的智能工艺设计方法。

3) 围绕关键构件抗疲劳制造,开展热处理与表面改性复合工艺技术研究。

技术、均匀流场设计与调控技术、加热-风冷协同控制技术的研究。研发立式真空油淬工艺与装备成套技术,开展油淬过程实时监测技术、油淬过程工件快速转移技术等研究。研发大尺寸真空低压渗碳工艺与装备成套技术,开展变脉冲渗碳技术、高渗碳均匀性炉体结构设计技术等研究。推广应用高效烧嘴、节能保温材料、余热回收利用、气氛回收、轻量化料盘工装等节能减量化技术,开展大型预抽真空精密可控气氛多用炉、连续炉的研发制造与产业化推广应用。

围绕热处理装备智能化发展要求,开发数字化、智能化的真空单室、双室、多室热处理设备及基于智能排产模块化、柔性化生产线,突破真空环境动态密封、多室移动对接、物料快速转移等关键技术,真空设备向批量大型化与单件精密化两个方向发展。开展真空在线控制反馈系统、高精度传感与测控技术,研发真空低

压渗碳碳势控制传感器。

完善高端热处理技术,推动全产业链绿色智能化先进热处理装备应用。以滚珠丝杠、导轨等大规模批产制造构件为依托,开展感应急速加热-喷淋快速淬火过程构件组织-应力演变机制研究,突破材料-构件-工艺热处理专家控制系统、关键参数在线检测-反馈-控制系统、异型构件等效加热/冷却、变截面构件脉冲感应均化等关键技术,突破以感应电源、流量计为代表的核心功能构件国产化制造,开发智能化表面感应连续热处理设备。以舰艇大型曲轴、机床一体化导轨等中等规模制造构件为依托,开发智能化表面感应淬火机床专机,实现通用型和专机型感应淬火热处理设备的“双轨”开发新模式。依托齿轮、轴承、车轴、车轮等典型件,研究基于耦合模型的热处理数字孪生与动态优化等新技术,开展控锻控冷+感应退火一体化设备的设计、制造和产业化,建立示范性的热处理数智化工艺开发平台与可视化智能制造生产线,实现绿色智能制造的更新换代。以大兆瓦风电领域的齿轮、轴承关键构件大规模制造为依托,开展“设计-材料-制造-应用”一体化中热处理调控技术示范应用研究,建立系统的设计-材料-制造-应用标准体系,实现大兆瓦风电关键构件的高质量发展。

专栏 2 热处理装备创新发展行动

01 绿色智能装备

1) 开发航空用超大型钛合金件真空退火工艺及成套设备、多功能离子渗氮工艺及成套设备、大型真空高压气淬成套设备、立式真空油淬成套设备、真空低压渗碳成套设备、10 t 及以上预抽真空精密可控气氛多用炉等绿色装备。

2) 开发智能化、数字化的真空单室、双室、多室热处理设备,智能化表面感应连续热处理设备,智能化表面感应淬火机床,多功能激光淬火设备等智能装备。

02 关键技术及基础配件

1) 开发热处理设备节能技术,热处理设备智能化技术,紊流态下流速测量、流速场构建与调控技术等。

2) 开发质量流量计、高精度温度传感器、离子流密度传感器、比色光电温度计、磨削烧伤传感器、CFC 碳纤维专用工装等关键基础配件。

3.4 高性能关键构件热处理核心技术开发

围绕航空航天装备、先进轨道交通装备、高档数控机床、石油化工装备、船舶装备、新能源装备等领域发展需求,重点突破时速 350 km 以上高速铁路轴承、高精机床主轴轴承、航空发动机轴承等长寿命高可靠性轴承,小型机器人、无人机用精密轴承,精度保持性达 6000 h 以上的高精度滚道丝杠、导轨,20 MW 及以上风力发电机组大型关键齿轮、齿圈,百万千瓦级核电反应堆压力容器用紧固件,高铁长寿命车轮、车轴、变速箱齿轮和转向

架弹簧,4000 吨及以上履带起重机减速器齿轮,大型舰船高速柴油机用曲轴等关键零部件的高性能化热处理,形成重大装备关键零部件热处理稳定生产制造能力。

围绕关键基础件的性能提升,突破 70 HRC 以上超高硬度齿轮精密热处理技术、关键构件真空离子表层硬化技术、特大型汽轮机低压转子组织分布调控技术、特大型支撑辊差温热处理和应力控制技术、大型高强轻合金结构件成型-热处理形性调控技术、航空复杂钛合金、高温合金件真空离子渗氮技术、四代齿轮轴承钢精密复合化学热处理技术、大型复杂先进高合金钢制件真空渗碳高压气淬技术、钛合金及高温合金整体盘件梯度热处理技术、钛合金抗氢脆耐磨防腐一体 PVD 强化技术、航空复杂薄壁焊接组件及长轴类零件气淬变形精密控制技术、复杂精密构件多场复合强化技术、4 米以上运载火箭贮箱主要结构件成型热处理匹配技术、可重复运载火箭关键结构件重复发射极端工况下基体组织结构及表面功能层体系、空间领域导电滑环贵金属关键构件组织结构及服役性能调控技术等。开展水-空交替控制淬火冷却技术、真空高压气淬技术在新能源大型构件的广泛应用。

专栏 3 高性能关键构件性能提升行动

重点突破长寿命、高精密、高功率密度、高承载关键构件的热处理核心技术,提升如高铁长寿命车轮、车轴、变速箱齿轮和转向架弹簧;新能源汽车用高速精密齿轮;大型燃气轮机高速精密长寿命齿轮;航空发动机及人形机器人关节减速器齿轮、航空发动机动力齿轮等关键构件的质量和寿命。针对航空航天、国防军工、轨道交通、新能源装备、汽车载具、矿山机械、石油化工、海洋船舶等领域关键基础件的热处理生产,突破绿色智能化热处理关键技术,并建立绿色智能热处理制造示范应用。

聚焦高性能关键零部件的制造示范应用,依托高档数控机床用滚珠丝杠等核心构件,形成材料-构件-工艺-装备-检测共性技术体系,系统探究滚珠丝杠等核心构件的“应用基础理论”、“应用技术”、“工程化生产”、“失效反馈”四要素全过程,实现滚珠丝杆关键构件高性能制造示范应用。以齿轮、轴承等典型件为切入点,基于耦合模型的热处理数字孪生与动态优化等新技术,建立示范性的热处理数智化工艺开发平台与可视化智能制造生产线,通过示范运行,对热处理数字孪生等技术进行验证与技术迭代,实现生产效率提升 50% 以上、能源消耗降低 80% 以上、污染物排放有效管控的发展目标。

立足于热处理基础共性技术的研究、形成先进热处理工艺技术、开发绿色智能热处理装备、重点突破高性能关键构件热处理核心技术,是加速发展热处理新质生产力的重要路径。热处理的高质量发展将为我国高端装备的发展提供有力支撑,为建设中国式现代化贡献行业力量。