机械金属材料热处理加工工艺分析

芮　芳
常州创思普特轨道交通科技有限公司　江苏　宿迁　213162

摘　要：机械金属材料作为工业生产的物质基础，其性能优劣直接关乎机械装备的可靠性、使用寿命及行业竞争力。因此，本文旨在分析金属材料热处理工艺的概述，重点强调金属材料热处理工艺与技术，包括化学热处理技术、激光热处理技术、热处理CAD 技术、真空热处理技术以及振动热处理技术等，并以机械金属材料热处理加工工艺的发展趋势作为切入点，以此来加强对机械金属材料热处理的研究，从而推动制造业高质量发展、提升我国高端装备制造水平，期望能够为相关人员提供参考，使其发挥出应有的作用和价值。

关键词：机械金属材料；热处理；加工工艺

引言：热处理加工工艺作为挖掘金属材料性能潜力的核心技术，通过对金属材料进行加热、保温与冷却的精准调控，能够显著改善材料的组织结构与力学性能，使普通金属材料实现从 “能用” 到 “好用” 的质变，在航空航天、汽车制造、能源装备等关键领域发挥着不可替代的作用。

1 金属材料热处理工艺的概述

金属材料热处理是指通过控制材料的温度来改变其物理、化学与机械性能。并且热处理能够使金属材料获得更高的硬度、强度、耐磨性以及耐腐蚀性等，并改善材料的韧性与可加工性。通常情况下，热处理过程包括加热、保温、冷却三个阶段：在加热阶段，金属材料被加热到特定的温度，以改变其晶体结构、组织状态；而在保温阶段是为了让金属材料内部的温度均匀分布，使其达到稳定的热平衡状态；此外，冷却阶段则是将金属材料迅速冷却至室温或低温，以固定其新的组织状态。

除此之外，热处理中使用的冷却介质与冷却速度取决于金属材料的种类，常见的冷却介质包括水、油与气体，而冷却速度则通过调整冷却介质的温度、流速与时间来实现。图1为金属材料热处理加工流程，因此，在金属材料的制造过程中，经过热处理后会产生内部应力，使得材料在使用过程中出现变形、裂纹以及失效等，通过降低金属材料在热处理期间的剩余应力，有效提升金属材料的耐久性，合理控制热处理过程中的温度、时间、冷却速率等参数，使金属材料获得更好的性能[1]。

作者简介：芮芳（1972.03.10-）女，汉族，江苏省宿迁市人，高中，副总经理，研究方向：热处理加工技术。

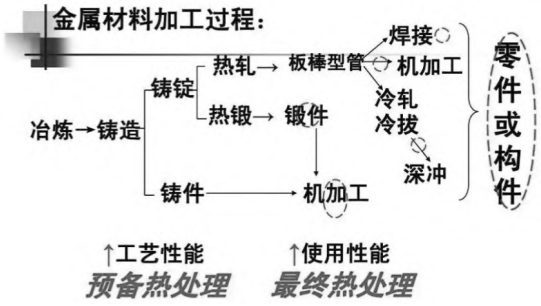

图1 金属材料热处理流程

2 金属材料热处理工艺与技术

2.1 化学热处理技术

该技术依据扩散原理构建，将特定元素渗透进金属表层，形成具有特殊性能的合金层。以渗碳工艺为例，在高温环境中，活性炭原子渗入低碳钢的表面，经淬火、回火处理后，使材料表面的硬度及耐磨性大幅提升，而材料心部仍保持良好的韧性，适合制造齿轮、轴类等机械零件；渗氮工艺借助氨气分解得到的活性氮原子，在中等温度下与金属反应，形成硬度极高、抗蚀性能优异的氮化层，多作为精密零件及模具的表面强化方法；碳氮共渗将渗碳和渗氮的优势结合起来，能以更短时间赋予金属优异的综合性能。化学热处理技术凭借其独特的改性效应，在航空航天、汽车制造、模具加工等领域广泛应用，切实满足了现代工业对金属材料高性能、长寿命的要求，成为提升金属材料表面质量及服役性能的重要技术途径。

2.2 激光热处理技术

该技术依据激光和金属材料相互作用的原理实施，在极短时间内将金属表层加热到相变或熔化所需温度，继而依靠材料自身热传导迅速冷却，形成极细小的晶粒组织或非晶态结构。在汽车发动机缸套表面处理中，

激光淬火能极大提高其耐磨及抗腐蚀性能，延长使用年限；在模具制造领域，激光熔覆可向模具表面添加高性能合金粉末，形成兼具高硬度与高韧性的涂层，提升模具抗疲劳及磨损能力。

与传统热处理技术相比，激光热处理具有加热速度快、冷却快、处理精度高、变形小等优点，还可实现局部处理，能精准限定处理区域及深度；该技术不借助化学试剂，契合可持续发展理念。凭借这些特性，航空航天、机械制造、能源等产业广泛应用激光热处理技术，成为推动金属材料性能提升与加工技术革新的关键因素。

2.3 热处理CAD 技术

该技术以材料的成分、原始组织等参数为基础，结合热处理工艺的既定目的，采用有限元分析、数值模拟等方法，开展加热、保温、冷却全过程中温度场、应力场及组织转变的动态仿真，直观呈现晶粒的长大、相变现象及变形开裂风险，例如在齿轮渗碳淬火工艺设计的过程中，热处理CAD技术可模拟在不同工艺参数情形下的碳浓度分布、硬度梯度与残余应力状态，辅助工程师对加热速率、保温时间及冷却介质进行优化处理，避免出现畸变以及开裂状况，提升产品质量。

此外，该技术还可以构建热处理工艺数据库，将不同材料的性能数据与工艺参数集成起来，通过快速检索与智能匹配，极大地缩短工艺开发的周期，降低工艺试错成本，随着人工智能与机器学习技术的深度融合，热处理CAD技术正朝着智能化、自适应方向加速迈进，可凭借实时监测数据动态对工艺参数进行调整，为金属材料热处理工艺的数字化变革与高质量发展提供核心技术支撑。

2.4 真空热处理技术

在真空环境下，金属表面不会出现氧化、脱碳现象，可有力保障工件尺寸精度及表面的光洁度，同时减少杂质元素的侵入量，维持材料的纯净性，此项技术借助真空炉营造稳定的加热环境，精准掌控温度、时间及冷却速度，能实现退火、淬火、回火、渗碳、渗氮等一系列热处理操作。对高速钢刀具实施真空淬火处理后，硬度和红硬性显著提高，使刀具寿命实现大幅延长。

针对航空航天的钛合金零件开展真空热处理工艺，可防止表面遭受污染侵害，保证其具备高强度、高韧性的性能要求，与传统热处理技术相比，真空热处理极大地提升了产品质量，还具备节能、环保以及营造友好工作环境等优点，降低了废气与废水的排放量，随着真空设备性能提升与工艺不断完善，真空热处理技术在精密机械制造、航空航天、电子信息等高端领域的应用不断拓展，成为推动金属材料综合性能提升的关键技术手段。

2.5 振动热处理技术

该技术依托位错运动与晶粒细化理论，在振动作用下，金属内部位错的增殖、滑移以及彼此交互作用加剧，推动残余应力释放与晶格畸变的消除，同时激发原子的扩散能力，加速再结晶进程，实现晶粒的细化。在大型焊接构件处理中，借助振动热处理可有效降低焊接残余应力，提升构件疲劳强度与尺寸的稳定性，对于铝合金等轻金属材料，该技术能实现铸态组织的细化，提高材料的塑性和韧性[1]。

与传统热处理技术相比，振动热处理无需使用复杂设备，可在不改变材料化学组成的基础上，大幅提高材料性能，还呈现能耗低、处理周期短、环保等特性。随着对振动与材料微观组织演变机制研究的深入，振动热处理技术在机械制造、汽车工业、航空航天等诸多领域呈现出极为广阔的应用前景，为优化金属材料性能开辟了创新路径。

3 机械金属材料热处理加工工艺的发展趋势

3.1 精确控制和模拟仿真

随着科技不断发展，对金属材料性能的要求十分严格，精确控制是调控材料性能的核心关键。凭借对热处理进程中温度、时间、冷却速率等核心参数的高精度控制，能精准调节金属的晶体构造与相变动态，实现所需的性能提升，采用先进的温度测量及控制方式，例如：光纤传感器和PLC等，可以实现温度的精准测量与实时监测，防止温度波动对材料性能造成不良影响，还可通过优化加热与冷却速率，显著提升材料性能水平[2]。如图2所示，图片源自网络。

图2 光纤传感器

模拟仿真技术同样展现出不可替代的作用，采用计算机模拟软件，可在实际开展热处理工作前，对热传导、相变等复杂过程进行模拟，这一技术为工艺参数的优化提供了科学依据，有利于预估热处理成效，减少实验成本与周期。以新型合金材料热处理工艺研发为例，在模拟仿真环境中，可对不同加热温度、保温时间及冷

却速度等参数的组合情况进行模拟分析，筛选出理想的工艺方案，而后开展实际生产来验证，极大提升了研发效率与成功概率。精确控制与模拟仿真相辅相成，模拟仿真为精确控制提供理论指引，精确控制将模拟仿真的成果转化为实实在在的生产力，该融合使金属材料热处理加工工艺的科学性与高效性更进一步，可更好地满足航空航天、汽车制造、新能源等高端领域对金属材料高性能、高品质的要求，引领整个制造业步入更高的发展阶段。

3.2 超快速加热和冷却技术

传统的热处理工艺在加热、冷却的速度范围存在局限，难以满足现代工业对金属材料日趋苛刻的性能期望，超快速加热冷却技术借助激光、电磁感应、电子束等新兴技术，实现了对加热和冷却过程的极速掌控。超快速加热及冷却过程中，激光技术凸显独特优势，其能在极短时间将高能量密度激光束聚焦于金属材料表面，使材料表层温度迅速上升，形成特定的温度梯度，而后可在瞬间实现快速冷却，促使金属材料内部组织结构发生明显变化，以此获得常规工艺难以形成的微观结构与性能表现。例如在某些航空航天用金属材料的处理中，激光超快速加热及冷却技术可实现晶粒细化，大幅提升材料的强度及韧性，适应航空部件在极端工况下的使用要求。如图3所示。图片源自网络。

图3 电子束

此外，电磁感应技术同样十分重要，通过采用交变磁场可以使金属材料内部产生感应电流，让材料自身急剧升温，加热速度极为迅猛。在超快速冷却阶段，采用高效冷却介质与装置，能精准地控制冷却速率，实现对材料相变过程的精准控制。在汽车发动机重要零部件的制造中，采用电磁感应超高速加热与冷却技术，能显著提升金属材料的耐磨性能与抗疲劳强度，延长零部件服役寿命。电子束技术同样为超快速加热及冷却提供了坚实支撑，被高能量电子束轰击的金属材料，可实现局部的超快速升温，并迅速完成冷却，其对一些特殊合金材料的处理效果极为显著，提升材料的综合性能[3]。

3.3 环境友好和节能减排

真空热处理技术在热处理时采用真空环境，防止了氧化与脱碳等情况发生，不仅提升了材料性能，也减少了因废品产生导致的资源浪费。其呈现出加热速度快、保温时间短的特点，极大降低了能源的消耗量，与传统的热处理方式相比，展现出明显节能效果。低温等离子体热处理技术也逐渐兴起，该技术在低温环境中对金属材料进行处理，减少了因高温处理产生的高能耗，处理过程中产生的废气、废渣等污染物显著减少，有力降低了对周边环境的危害。

在淬火操作阶段，传统的水、油等淬火介质，既可能造成环境污染，又会消耗大量能源，新型淬火介质不断涌现。气体淬火介质，如氮气、氩气等，借助其本身的惰性及高比热容特性，实现均匀且快速的冷却，淬火引发的变形幅度较小。对比传统的油淬工艺，能耗降低50%以上。聚合物淬火液通过在水中添加聚合物，实现了沸点提高、蒸发减少，降低了淬火速度，缩短了淬火时间，以此降低了能源消耗，在保障淬火质量的同时，体现出良好的节能及环保效果。

废热回收利用技术也同样重要，通过安装换热器等装置，对热处理阶段产生的大量废热进行回收，应用于工件预热及其他生产环节，优化了能源的综合利用效率。在气氛控制方面，通过调整气氛内氮气、氢气以及碳氢化合物的比例关系，适度控制气氛的流量及循环速度，去除气氛中的有害杂质，精准控制碳势水平，既减少了工件出现脱碳的现象，降低了工件废品的发生率，还通过采用低能耗气氛发生器等技术手段，实现了能耗减少与温室气体排放量的降低。机械金属材料热处理加工工艺正从多维度实现环境友好与节能减排，为行业的可持续发展开辟新路径[4]。

3.4 自适应和智能化控制

自适应控制技术可实时对热处理过程中的各类参数进行监测，进而根据实际情况自动调适工艺参数。在金属材料加热或冷却的过程中，系统能根据温度、应力、组织变化等反馈信息，实时对加热速率、保温时间、冷却速度等核心参数进行动态优化。航空航天领域对金属材料性能的要求极高，自适应控制可确保在加工钛合金这类难加工材料时，精准调整工艺细节，使材料性能适应严苛的使用场景，避免因材料性能波动导致的安全隐患。

智能化控制凭借先进的传感器、数据采集系统和人工智能算法，实现热处理操作的全面智能管理。通过在设备中集成不同类型传感器，能实时获取温度、压力、

位移等多维度数据，接着借助大数据分析与机器学习算法对这些数据进行深度分析与挖掘，从而精准预估热处理时材料微观结构变化和性能的动态演进。

3.5 产业链协同化

在全球制造业持续发展与产业结构深度调整的大背景之下，机械金属材料热处理加工工艺相关产业链协同化态势愈发明显，产业链协同主要表现为原材料供应、生产加工、技术研发、市场应用及服务支持等环节的紧密协作与协同推进，热处理加工企业与上游原材料供应商确立长期稳定合作关系至关重要，如此能让原材料质量稳定且供应稳定可靠，以航空航天领域为例，该领域对金属材料性能的要求极高，仅当热处理企业与原材料供应商深度协同，才可保障所供给的金属材料经过热处理之后，完全符合航空航天零部件的苛刻标准。

在生产加工及技术创新方面，二者的深度交融已然成为驱动产业链协同发展的核心动力，企业持续把智能化、自动化技术引入生产加工环节，大幅提升生产效率及产品质量；为符合市场多样化要求，诸多企业纷纷加大研发投入，积极跟高校、研究机构开展深度合作，共同聚焦于新型热处理技术的创新开发，围绕汽车轻量化需求，开发出契合的热处理工艺，让金属材料在减轻重量的同时，依然维持着良好的强度和韧性水平。

下游行业技术上的进步与产业升级，要求热处理行业持续适应市场的变化，拓展全新的应用范畴，而且跟下游企业建立紧密的合作格局，在电子信息产业方面，伴随电子产品朝着小型、高性能方向演进，金属材料的热处理工艺面临全新要求，电子信息企业跟热处理企业协同合作，研发出契合需求的新热处理工艺，携手推动产业链迈向新高度。

3.6 表面处理技术多样化

磨切工艺通过磨损原料边缘，能显著提升工作件的尺寸精度与表面粗糙度。工作件置于高速旋转的磨盘上，借助摩擦力削去部分边缘，常用于将大型零件精确加工至小尺寸，以及优化零件的形状和尺寸准确性。刮毛机刃法则利用高速度刮毛机刃，快速且高效地去除金属材料表面的氧化皮层、油脂和灰尘等杂质，不仅清洁物体，还能提升其光滑度，为后续涂装等工序做好铺垫，同时可用于修复锐利边角、整理弯曲或扭曲的物体。焊接后研磨（钻孔）法融合焊接与研磨，先将需连接的部分在相同温度下融合，再对连接部位精密钻孔，最后抛光，这对航空航天等领域中对绝对位置准确性要求极高的零部件制造意义重大。

表面硬化治疗通过化学或物理方法，向金属材料表面渗入氮气、二硫化碳气体或某些盐类等元素，增加表面硬度，进而提高材料的耐腐蚀性、耐热性及抗疲劳性能，像模具钢熔炼时加入氮气形成的淬火层，强度更高且更持久。金属粉末涂覆（PVD）技术将微细颗粒悬浮于电离气体中，使其高速撞击目标物体，形成坚固结晶结构薄膜。

结论：综上所述，机械金属材料热处理加工工艺是提升材料性能、保障工业产品质量的关键环节。从基础工艺原理来看，通过对加热、保温、冷却过程的精准控制，能够有效改变金属材料的组织结构与力学性能，使其满足不同工业领域的应用需求。

参考文献

[1]白阳,李松,宗伟.金属材料热处理工艺与技术分析[J].化工管理,2024(25):151-154

[2]宋磊.金属材料热处理变形的影响因素与控制策略解析[J].冶金与材料,2025,45(3):181-183

[3]胡丽刚.机械加工制造中金属材料热处理工艺的应用[J].中国科技纵横,2024(9):70-72

[4]陈娟.金属材料热处理的冶金技术控制性能分析[J].工程建设(维泽科技),2025,8(1):91-93