

机械工程材料与热加工工艺

孙宏伟

中车福伊特传动技术(北京)有限公司 北京 102202

摘要:为契合高端制造产业对机械装备性能的升级需求,分析材料与加工工艺的内在关联,本文围绕机械工程材料与热加工工艺的核心关联展开研究,系统梳理材料的分类、关键性能及热加工工艺的基础理论与分类,深入分析金属与非金属材料的热加工工艺及应用机理,探讨热加工工艺与材料性能的影响规律及适配性设计路径,预判行业未来发展趋势。研究结合材料特性与工艺原理,明确二者协同优化的核心逻辑,为机械工程领域材料选型、工艺优化及性能提升提供理论参考,助力行业向高性能、智能化、绿色化方向转型,满足高端制造对材料与加工技术的需求。

关键词:机械工程材料;热加工工艺;材料性能;工艺适配性;发展趋势

引言:机械工程材料与热加工工艺是机械制造领域的核心支撑,其技术水平直接决定装备性能与服役可靠性。随着高端制造产业升级,对材料性能与加工精度的需求持续提升,传统材料与工艺的局限性日益凸显。本文立足行业发展需求,以材料与工艺的协同关系为核心,从分类、机理、关联、适配及趋势多维度展开论述,旨在分析热加工工艺对材料性能的调控机制,建立科学的适配设计方法,为突破技术瓶颈、推动工艺创新提供理论支撑,契合行业高质量发展的现实诉求。

1 机械工程材料的分类及性能

1.1 机械工程材料的核心分类及特性

机械工程材料按化学成分及属性可分为金属材料与非金属材料两大类,二者在机械制造领域各占据核心应用场景。(1)金属材料凭借优异的力学性能成为主流,涵盖钢铁材料与有色金属及合金,其中钢铁材料以低碳钢、中碳钢、合金钢为代表,具备高强度(抗拉强度普遍 $\geq 300\text{MPa}$)、易加工性,广泛应用于机床、工程机械构件,占机械制造用材料总量的60%以上;有色金属及合金如铝合金、铜合金、钛合金,兼具轻量化、耐腐蚀等优势,适配航空航天、精密仪器等高端领域。(2)非金属材料包含高分子材料、陶瓷材料及复合材料,高分子材料如工程塑料、橡胶,具有减震、绝缘、成型便捷的特点,多用于零部件密封、防护结构;陶瓷材料硬度高(莫氏硬度 ≥ 8)、耐高温(可承受 1000°C 以上高温),适用于极端工况下的耐磨件;复合材料通过基体与增强相复合,实现性能互补,如碳纤维增强树脂基复合材料,比强度是普通钢材的5-8倍,已成为轻量化装备的关键材料。

1.2 机械工程材料的关键性能及评价指标

机械工程材料的性能直接决定其应用适配性,核心评价指标涵盖力学性能、物理性能及化学性能。(1)力

学性能是材料抵抗外力作用的能力,主要包括强度、塑性、硬度、韧性及疲劳强度,强度决定材料承受载荷的极限,塑性保障加工成型及服役安全性,硬度影响耐磨性能,疲劳强度则关乎零部件在循环载荷下的使用寿命,是动载机械零件的核心考核指标。(2)物理性能包含密度、导热性、导电性、热稳定性等,密度影响装备轻量化设计,如铝合金导热系数约 $200\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,适配散热零部件需求;导电性以铜为基准,满足导电零部件选型要求。(3)化学性能主要体现为耐腐蚀性、抗氧化性,针对潮湿、酸碱、高温等恶劣工况,如304不锈钢在中性盐雾环境下耐腐蚀时间 ≥ 1000 小时,材料的耐腐蚀及抗氧化能力直接决定其服役周期^[1]。

2 热加工工艺的基础理论与分类

2.1 热加工工艺的基础理论支撑

热加工工艺的核心理论源于材料热力学与塑性变形动力学,其本质是通过温度场调控与外力协同作用,改变材料内部组织结构以实现成型与性能优化。热力学基础聚焦于加热-冷却过程中材料的相转变规律,包括相变温度、相平衡条件及相变潜热传递,决定材料组织演变的方向与程度;塑性变形动力学则围绕高温下材料的流变特性,分析应力、应变、温度及变形速率的耦合关系,为工艺参数优化提供理论依据。热加工过程中的扩散理论的作用至关重要,原子扩散能力随温度升高显著增强,直接影响材料的致密化、成分均匀性及界面结合质量,是保障热加工件性能稳定性的核心理论支撑。

2.2 热加工工艺的核心分类及技术特征

热加工工艺按技术原理与应用场景可分为传统工艺与先进工艺两大类。传统热加工工艺包括铸造、锻造、焊接及热处理,技术成熟且应用广泛;铸造通过液态金属充填型腔成型,适用于复杂结构件;锻造依靠塑性变

形细化晶粒,提升材料强度与韧性;焊接实现材料的永久性连接,满足结构整体性需求;热处理通过控温改变组织,精准调控材料力学性能。先进热加工工艺依托新技术迭代发展,激光熔覆可实现零部件修复与表面强化,热等静压能显著提升材料致密度,粉末冶金热加工则突破传统工艺局限,适配高性能合金制备^[1]。

3 不同材料的热加工工艺及应用机理

3.1 金属材料的典型热加工工艺及机理分析

金属材料热加工工艺以温度调控与塑性变形为核心,通过精准改变内部组织结构优化力学及理化性能,核心机理围绕相转变动力学、晶粒演变规律及界面作用机制展开,不同工艺的调控逻辑与应用效果差异显著,具体分析如下:(1)钢铁材料的热处理工艺及组织演变。依托精准控温加热与梯度冷却,调控奥氏体、铁素体、渗碳体等相组成及分布,实现性能定制。正火经850-950°C加热后空冷,使组织均匀化,晶粒细化至10-20 μm ,综合力学性能较未处理材料提升15%-20%;淬火以 $\geq 100^\circ\text{C}/\text{s}$ 速率快速冷却,抑制珠光体转变获得马氏体,硬度提升30%-50%但伴随较大内应力;回火通过200-600°C保温缓解应力,调整马氏体稳定性,降低脆性25%以上并保留强度;退火经缓热缓冷消除加工硬化,塑性提升20%-30%、改善切削加工性,核心是调控温度场下的相转变与晶粒长大规律。(2)有色金属合金的锻造与挤压工艺及性能调控。铝合金、铜合金等在300-500°C高温下塑性优良,锻造与挤压通过外力促使材料塑性变形,机理聚焦位错滑移与动态再结晶带来的晶粒细化。锻造中,内部晶粒随变形破碎,后续再结晶形成5-15 μm 细小等轴晶,致密度达98%以上;挤压通过模具约束使材料定向流动,组织均匀且内部缺陷率降低40%。性能调控关键在于协调变形参数,如6061铝合金挤压时,控制温度420°C、变形速率10mm/s,可保证晶粒均匀性,避免开裂与组织偏析。(3)金属材料焊接工艺的熔池形成与接头质量机理。通过电弧、激光等热源使待焊金属熔化形成熔池,机理与热源特性、金属热物理性质相关,涉及热量传递与液态金属流动。碳钢电弧焊熔池温度1500-1800°C,热量传递效率60%-70%,液态金属在表面张力与电弧压力作用下形成稳定熔池。接头质量由凝固过程决定,晶粒从熔合线向中心生长为柱状晶或等轴晶,气孔、裂纹等缺陷与凝固速率、成分均匀性相关,核心是调控焊接参数优化熔池状态,保障接头组织完整。(4)金属基复合材料的热加工兼容性 & 界面行为。以铝基碳化硅复合材料为例,其热加工兼容性取决于基体与增强相的热膨胀系数、熔点匹配度,二者差值超 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 易引发界面开裂。高温下二

者会发生元素扩散与化学反应,需控制加工参数,如锻造温度低于500°C,可抑制界面过度反应,维持 $\geq 30\text{MPa}$ 的界面结合强度,同时保证增强相均匀分布,避免团聚或断裂。例如某厂对45号钢连杆采用“正火+淬火+低温回火”工艺,880°C正火空冷细化晶粒,850°C油冷获得马氏体,220°C回火消除应力,最终连杆硬度达HRC40-45,冲击韧性 $\geq 40\text{J}/\text{cm}^2$,满足发动机高强度工况需求。

3.2 非金属材料热加工工艺的特点与应用机理

非金属材料热加工受自身成分与结构特性制约,与金属材料相比,更侧重成型致密化、界面控制及缺陷调控,不同类型材料的加工逻辑与机理差异明显,具体如下:(1)高分子材料的注塑、挤出工艺及参数优化。注塑将高分子材料熔融后,在5-50MPa压力下填充模具冷却成型,效率达1000-5000件/小时,尺寸误差 $\leq \pm 0.05\text{mm}$;挤出工艺可连续生产管材、板材等型材,连续性强。参数优化核心是调控温压与冷却速率,如聚丙烯注塑时,180-220°C加热、20°C/min冷却,可将结晶度控制在30%-40%,避免缩痕、翘曲,保障成型件稳定性。(2)陶瓷材料的烧结工艺与致密化机制。通过高温加热使坯体颗粒粘结重排实现致密化,致密度直接决定力学性能,致密化机制包括表面扩散、体积扩散及晶界迁移,高温下颗粒间形成颈部连接以消除孔隙。氧化铝陶瓷在1500-1700°C烧结2-4h,致密度从55%-65%提升至95%以上;烧结需严控温时与气氛,温度超1750°C易致晶粒异常长大(超50 μm),含氧不足则残留孔隙,均会降低材料力学性能。(3)非金属复合材料的界面结合控制。以玻璃纤维增强环氧树脂为例,界面结合质量直接影响整体性能,核心是调控结合状态与强度。热加工中,120-180°C温控可促进界面浸润粘结,使剪切强度达25-35MPa,抑制剥离与孔隙。模压成型时,维持10-20MPa压力、 $\leq 5^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温速率,可避免有害反应,保障载荷有效传递。(4)非金属材料热加工的缺陷预防与改进。孔隙、裂纹等缺陷源于参数不匹配与材料特性差异,缺陷率需控制在5%以下。预防核心是优化参数匹配,改进措施包括预处理与工艺调整,如陶瓷坯体烧结前真空干燥至含水率 $\leq 0.5\%$,高分子材料注塑前除潮至含水率 $\leq 0.2\%$,搭配加热曲线与模具优化,可使缺陷率降低30%-40%,提升件体完整性与稳定性^[3]。

4 热加工工艺与材料性能的关联及适配设计

4.1 热加工工艺对机械工程材料性能的影响规律

热加工工艺通过调控材料内部组织结构影响其性能,核心是工艺参数与性能的耦合关系。温度、保温时间等参数直接决定晶粒尺寸,钢铁加热温度每升高100°C,原

子扩散速率提升3-5倍,变形量控制在20%-40%可使晶粒细化30%-50%。晶粒细化遵循霍尔-佩奇关系,尺寸减半能使屈服强度提升15%-20%;不当工艺易致性能劣化,过热使晶粒粗大,韧性下降40%以上。残余应力超屈服强度30%易引发开裂,后续处理可释放80%以上应力,界面孔隙率超5%会使复合材料强度下降25%。

4.2 机械工程材料与热加工工艺的适配性设计

适配性设计以材料特性与工艺匹配为核心,最大化材料性能。需结合熔点、塑性选工艺,热敏感性合金钢加热速率 $\leq 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$,塑性差的铸造铝合金变形速率控制在5-15mm/s。以性能为目标优化参数,不锈钢控轧控冷至晶粒 $\leq 10\mu\text{m}$,屈服强度可达500MPa以上。同时兼顾可行性与经济性,批量零件用连续热处理,效率提升40%以上,单位成本降低20%-25%。

例如某厂对304不锈钢板材进行控轧控冷适配工艺,加热至1100 $^{\circ}\text{C}$ 保温1.5h,变形量30%后以20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 冷却,最终板材屈服强度达520MPa,晶粒尺寸8 μm ,满足化工设备高强度、耐腐蚀需求。

5 机械工程材料与热加工工艺的发展趋势

机械工程材料与热加工工艺以性能升级、技术迭代、绿色转型为核心,呈现多维度融合创新态势,具体趋势如下:(1)新型材料研发向精准化、高性能化突破。依托人工智能与大数据优化研发流程,缩短验证周期,精准调控成分与微观结构,聚焦高强、耐蚀、耐高温及轻量化特性,推动高性能合金、复合体系迭代,强化极端工况适配能力。(2)热加工工艺向智能化、精准化升级。以数值模拟、AI调控及自动化为核心,构建全流程闭环控制,实时监测调整温度场、应力场,优化能量输入与参数匹配,

提升加工一致性,突破传统工艺局限。(3)绿色低碳为核心导向。推广节能装备与工艺,降低全流程能耗,采用环保辅料减少排放,构建全生命周期绿色体系,探索废料回收路径,实现环境与经济效益协同。(4)材料与工艺协同一体化深化。结合材料特性设计适配方案,建立性能与工艺参数耦合模型,优化全链条流程,突破异种材料加工瓶颈,提升适配兼容性。(5)跨领域融合催生新业态。紧扣高端需求,研发特种材料与专用工艺,促进多学科交叉融合,催生数字孪生加工系统等,推动行业高端化、智能化转型^[4]。

结束语:本文全面剖析了机械工程材料与热加工工艺的核心内容及内在关联,明确了不同材料热加工机理、工艺与性能的适配逻辑及行业发展方向。研究表明,材料与工艺的协同优化是提升装备性能、推动行业升级的关键。限于研究维度,部分新型复合材料加工机理仍需深入探索。未来可聚焦跨领域技术融合,强化智能化与绿色化技术研发,完善适配设计体系,助力机械制造业突破现有局限,为航空航天、新能源等高端领域提供更可靠的材料与加工技术支撑。

参考文献:

- [1]侍学婷,任鹏.机械设计过程中机械材料的选择和应用探析[J].中国金属通报,2022,(10):80-82.
- [2]徐萌,吴加凤,曹杰.金属材料及机械材料在机械设计中的应用研究[J].中国金属通报,2022,(10):83-85.
- [3]矫健.机械设计中材料的选择及其应用[J].农业装备技术,2021,47(04):63-64.
- [4]李明.热加工技术在重型机械制造中的应用与发展[J].重型机械,2023,56(4):12-16.