

金属材料热处理工艺在机械制造中的应用分析

李杰 豆广东

河北石油职业技术大学, 河北 承德 067000

摘要: 随着机械制造业的快速发展, 金属材料的热处理工艺逐渐成为提升零件性能、延长使用寿命的重要技术手段。本文详细分析了金属材料热处理的基本原理、工艺分类以及影响参数, 深入探讨了该方法在合金钢材料中的应用。研究指出, 通过调控温度、保温时间和冷却速率, 热处理工艺能够有效提升材料的硬度、强度、韧性和尺寸稳定性, 满足机械制造对高性能零件的需求。未来, 随着技术的进一步创新, 热处理工艺将在智能化和绿色化制造领域发挥更加关键的作用。

关键词: 金属材料; 热处理工艺; 机械制造

Analysis of the Application of Heat Treatment Processes for Metal Materials in Machinery Manufacturing

Li, jie Dou, Guangdong

Hebei Petroleum Vocational and Technical University, Chengde, Hebei, 067000, China

Abstract: With the rapid development of the machinery manufacturing industry, heat treatment processes for metal materials have gradually become important technical means to improve part performance and extend service life. This paper provides a detailed analysis of the basic principles, process classifications, and influencing parameters of heat treatment for metal materials, and delves into the application of this method in alloy steel materials. The research indicates that by regulating temperature, holding time, and cooling rate, heat treatment processes can effectively enhance the hardness, strength, toughness, and dimensional stability of materials, meeting the demand for high-performance parts in machinery manufacturing. In the future, with further technological innovation, heat treatment processes will play a more crucial role in intelligent and green manufacturing.

Keywords: Metal materials; Heat treatment processes; Machinery manufacturing

DOI: 10.62639/sspis34.20240103

金属材料的热处理工艺在机械制造中具有举足轻重的地位, 是提升零件性能、延长使用寿命的重要手段之一。根据《中国机械工业年鉴》发布的数据显示, 热处理技术在我国机械制造中的应用占比逐年提升, 尤其是在航空、汽车、船舶及精密仪器制造等领域, 热处理工艺已成为关键环节。热处理不仅可以显著提高材料的硬度、强度和耐磨性, 还能改善零件的加工性能与尺寸稳定性^[1]。近年来, 随着热处理技术的不断创新, 智能化、绿色化和高效化的热处理工艺逐渐普及, 为机械制造行业的转型升级提供了重要支撑。根据 2023 年的《中国热处理行业发展报告》显示, 我国热处理工艺的自动化控制水平显著提高, 热处理设备的节能减排效果也日益凸显, 为推动机械制造业高质量发展打下了坚实的基础。

一、金属材料热处理工艺分析

(一) 热处理等基本原理

金属材料的热处理是一种依靠改变材料的微观组织结构来改善其性能的加工方法, 它的核心

原理是通过控制温度、加热时间以及冷却方式等参数, 来实现金属的组织转变和相应的性能提升。热处理过程通常与金属的相变有关, 例如奥氏体向马氏体的转变, 或是碳化物的析出, 从而影响材料的硬度、韧性、耐磨性等特性^[2]。

(二) 热处理工艺参数

1. 温度

不同金属材料在不同温度下会发生不同的相变, 进而改变其力学性能。一般来说, 热处理温度需要根据材料的相图和具体性能要求进行精确控制。例如, 钢材的淬火温度通常需要高于其奥氏体化温度, 这样才能形成足够的奥氏体组织, 在快速冷却后转化为硬度更高的马氏体组织^[3]。对于铝合金和钛合金等有特殊处理要求的金属, 热处理温度的波动不仅会影响材料的硬度和强度, 还会影响其抗腐蚀性和尺寸稳定性。

2. 保温时间

保温时间决定了金属内部相变的完全性, 不同的保温时间会影响材料的组织细化程度和元素扩散效果。对于钢材等材料, 过短的保温时间可能导致奥氏体未完全形成或碳化物未充分溶解, 影响最终的硬度和强度; 而过长的保温时间则可

(稿件编号: IS-24-3-4008)

作者简介: 李杰 (1990-08), 男, 汉族, 籍贯: 河北省承德市, 安全工作处, 职称: 讲师, 硕士学历, 研究方向: 材料科学与工程。
豆广东 (1989-02), 男, 汉族, 籍贯: 甘肃省庆阳市, 招生就业处, 职称: 讲师, 硕士学历, 研究方向: 材料工程。

基金项目: 承德高新区科技创新创业苗圃项目《一种海洋平台用高强钢的成分及热处理工艺研发》(CGX2021KMP0029)。

能导致晶粒粗大, 降低材料的韧性。一般来说, 设定保温时间需结合材料的厚度、热导率和设备的加热方式等因素, 保持相变过程充分、均匀。针对一些特殊的金属或合金材料, 保温时间的控制还需要结合工艺要求, 避免出现过度氧化或过烧等缺陷。

3. 冷却速率

冷却速率决定了材料的最终组织形态和力学性能, 冷却速率的快慢直接影响相变的类型和过程, 例如在淬火处理中, 快速冷却有助于奥氏体转化为马氏体, 显著提高材料的硬度; 而在回火处理中, 缓慢冷却可以避免内应力的产生, 保持材料的韧性和平衡性能^[4]。冷却速率不仅受冷却介质(如水、油、空气或盐浴)的影响, 还与材料的导热性能和零件的几何形状有关。对于不同材料和工艺要求, 合理选择冷却速率是非常重要的, 既要防止因冷却过快导致的开裂或变形, 又要避免冷却过慢导致的相变不充分或性能不足。

二、金属材料热处理工艺对机械制造的影响

(一) 硬度和强度的提升

热处理工艺通过调控材料的相变过程, 可以显著提高其硬度和强度, 以淬火工艺为例, 当钢材在高温下快速冷却后, 其内部的奥氏体相会转变为高硬度的马氏体组织, 这一转变极大地提高了材料的硬度。根据材料科学的研究, 不同的热处理参数会直接影响硬度的提升程度, 例如更高的淬火温度和更快的冷却速率往往能得到更硬的材料。与此同时, 热处理还能通过析出强化、固溶强化等方式提高材料的强度, 这对于提高机械零部件在高负荷条件下的使用寿命具有关键作用。

(二) 韧性和耐磨性的调节

韧性与耐磨性往往处于硬度与强度的对立面, 增加硬度的同时会降低韧性。因此, 热处理工艺在提升材料硬度的同时, 也需要合理调节其韧性和耐磨性, 以实现性能的平衡。例如, 回火工艺可以在淬火后的钢材中降低部分马氏体的脆性, 提升其韧性。金属材料在实际应用中往往需要具备高耐磨性以承受长时间的摩擦和磨损, 而耐磨性也可以通过控制热处理工艺来实现, 例如利用碳化物的析出或表面硬化处理, 使材料表面具备更强的抗磨能力。机械制造中, 尤其是对于需要长时间运转的设备零件, 耐磨性的提升有助于延长使用周期, 降低维修和更换的频率。

(三) 尺寸稳定性的保障

热处理工艺能够有效降低材料的残余应力, 从而减少零件在使用过程中发生变形的风险。具体而言, 退火和正火工艺能够通过缓慢的冷却过程, 释放材料内部的应力, 提高尺寸稳定性。此外, 某些热处理工艺可以控制材料的微观结构, 使得在后续使用过程中材料的热胀冷缩更

加均匀, 从而保证尺寸的稳定性。在精密机械制造领域, 特别是对于发动机部件或高精度轴承这些要求高精度的零件, 尺寸稳定性是极为关键的指标, 热处理工艺对此具有不可替代的作用^[5]。

三、金属材料热处理在机械制造中的应用

(一) 钢材件的热处理工艺

在机械制造中, 钢材件的热处理工艺是提升零件综合性能的关键环节, 整个过程包括加热、保温和冷却三个阶段, 每个阶段都需根据零件的材质、性能要求及实际应用场景进行精确调控。首先, 在加热阶段, 通常会根据钢材的成分和需要的相变温度, 将材料加热至临界温度以上, 例如普通低碳钢的加热温度多在 750℃ 到 900℃ 之间, 目的是将材料的原有晶体结构转变为奥氏体组织。在这一过程中, 加热速度的控制非常关键, 过快的加热会导致表面和内部温度差异过大, 引发热应力, 甚至导致开裂。接着是保温阶段, 时间的长短取决于钢材的厚度及工艺要求。通常, 厚度较大的工件需要较长的保温时间, 以确保整个工件内外均匀受热。例如, 对于较厚的合金钢件, 保温时间可能长达数小时, 确保充分相变。保温的另一个作用是为后续冷却阶段的组织变化奠定基础。冷却速率则是决定最终性能的关键参数, 淬火是典型的冷却方式, 钢材件在淬火介质(如水、油或空气)中迅速冷却, 快速转化出马氏体组织, 使其硬度大幅提升。然而, 不同的零件对硬度与韧性的要求各不相同, 对于高强度要求的齿轮或轴类零件, 通常需要较快的冷却速率; 而对于韧性要求较高的零件, 冷却速率则相对较慢, 甚至采用空气冷却以防止材料变脆。淬火后的钢材往往还需进行回火处理, 将其加热到 200℃ 到 650℃ 之间进行缓慢冷却, 以减少淬火带来的脆性, 增强其韧性和抗冲击性能, 从而在强度和韧性之间取得平衡。

(二) 热处理工艺在提升合金钢低温韧性中的应用

热处理工艺在提升合金钢低温韧性方面具有重要作用, 适用于极地设备和低温储罐等需长期承受低温环境和强烈冲击的零件。一般情况下, 低温韧性的提升需要通过淬火和随后的低温回火工艺来实现, 16Mn 和 9Ni 钢等合金钢材料在淬火过程中被加热至其奥氏体化温度, 这个温度通常在 850℃ 到 950℃ 之间, 具体取决于材料的化学成分。在此阶段, 材料内部的晶粒发生重排, 转变为均匀的奥氏体组织, 之后立即进行快速冷却, 通常采用油或水作为冷却介质, 使奥氏体迅速转变为硬度极高的马氏体组织。淬火后的材料虽然硬度显著提升, 但其韧性大幅下降, 导致在低温环境中容易发生脆性断裂。为解决这一问题, 回火工艺成为必不可少的步骤, 尤其是低温回火。回火过程中, 材料被再次加热至低于马氏体转变温度的

范围内, 通常设定在 200℃至 400℃之间, 这样可以有效减少材料内部的残余应力, 并优化其微观组织结构, 从而显著提升其低温韧性。对于 16Mn 和 9Ni 钢而言, 回火温度一般控制在 250℃至 300℃之间, 保温时间则根据零件的厚度和体积来确定, 一般是在 2 小时到 4 小时之间, 该时长可以促进奥氏体组织充分分解并生成回火马氏体或回火贝氏体。回火后的冷却速率同样需要精确地控制, 常采用空气冷却, 这样可以防止材料再次产生过多的内应力或晶粒粗化, 影响韧性表现。

(三) 热处理工艺在增强合金钢疲劳强度中的应用

在航空航天、汽车制造和桥梁建筑等承受周期性载荷的部件中, 热处理工艺的应用可增强合金钢疲劳强度, 采用感应淬火和渗碳淬火等表面硬化处理, 可大幅提升材料的表面层硬度, 显著增强它的抗疲劳性能。具体来说, 齿轮和传动轴等零件, 首先进行感应淬火, 将其加热到奥氏体化温度范围内 (850℃至 950℃之间), 随后快速冷却, 一般采用油或水作为淬火介质, 在表面层形成高硬度的马氏体组织, 保持核心部分较为韧性的组织结构。这种“外硬内韧”的结构特性使得表层具备极高的抗疲劳能力, 而核心部分则拥有足够的韧性来吸收冲击载荷, 防止材料因脆性而发生断裂。为了进一步增强合金钢的疲劳强度, 中温回火工艺通常紧随淬火之后进行, 回火温度一般控制在 250℃至 450℃之间, 保温时间为 2 到 4 小时, 具体时间依据零件的尺寸和厚度而定, 目的是缓解材料在淬火过程中产生的残余应力, 减少疲劳裂纹的萌生几率。对于汽车发动机的曲轴或飞机起落架等需要承受极高动态载荷的零件, 常采用渗碳淬火工艺, 首先将合金钢零件加热到 900℃至 950℃之间, 并在渗碳气氛中保持数小时, 使碳原子扩散进入表层, 随后迅速淬火, 使表面形成高硬度的渗碳马氏体层, 硬度可达 HRC60 以上, 而内层则保持韧性良好的组织结构。除了传统的表面硬化工艺, 等温淬火也逐渐被广泛应用于提高疲劳强度的领域。等温淬火通过在材料的马氏体转变温度范围内保温, 使奥氏体逐渐转变为贝氏体或珠光体组织, 有效避免了快速冷却带来的应力集中问题, 同时优化了内部应力分布, 防止因残余应力集中而引发的疲劳破坏。

(四) 热处理工艺在提升合金钢耐腐蚀性能中的应用

在海洋工程、化工设备等长期处于腐蚀性环境的领域中, 也常常需要用到热处理技术来提升合金钢的耐腐蚀性能。合金钢的耐腐蚀性能直接受到其微观结构和合金元素分布的影响, 因此, 固溶处理成为了提升耐腐蚀性的重要工艺之一。首先, 固溶处理通常在高温环境下进行, 具体温度根据合金钢的成分来确定, 例如含有大量铬和镍的奥氏体不锈钢, 固溶处理温度通

常在 1050℃至 1150℃之间, 在这个温度范围内, 合金元素如铬、镍、钼等充分溶解进入基体, 均匀分布于奥氏体或铁素体组织中。该工艺的一个关键操作细节是快速冷却, 采用水冷方式将钢材从高温迅速冷却至室温, 防止析出相或碳化物的形成, 保持固溶元素的均匀分布, 大幅提升抗腐蚀性能。这一过程尤其适用于需要在海洋环境中使用的材料, 经过固溶处理后, 合金钢在海水中的抗氯化物腐蚀能力显著增强, 有效抵御了海水中的盐分侵蚀。此外, 针对含有大量铬的合金钢, 采用合理低温时效处理, 可以在表面生成致密的氧化铬钝化膜, 这种钝化膜是一层自然形成的防护层, 厚度通常在几纳米至几十纳米之间, 能够有效隔离腐蚀介质, 提高合金钢的耐海水腐蚀能力。要想更好地提升抗腐蚀性能, 针对化工设备中的管道和储罐等酸碱环境, 合金钢通常采用淬火加低温回火的组合工艺。在淬火过程中, 钢材加热至奥氏体化温度范围内 (850℃至 950℃), 迅速冷却后获得高硬度的马氏体组织, 随后的低温回火处理温度一般控制在 200℃至 350℃之间, 保温时间根据零件厚度和所需性能确定, 通常为 1 至 3 小时。

四、结束语

总的来说, 金属材料的热处理工艺在机械制造领域的应用极为广泛, 不仅可以大幅提升材料的硬度、强度和韧性, 还能在低温环境、腐蚀性介质中有效延长零件的使用寿命。然而, 在实际应用中, 热处理工艺的选择和操作需根据不同材料的性能要求和工作环境进行精细调控, 从而更好地避免产生过度脆化或应力集中等问题。随着科技的不断进步, 未来智能化和绿色化的热处理技术将会在提升生产效率、节能减排等方面发挥更大作用, 为机械制造行业带来新的突破和机遇。与此同时, 反思现有的工艺手段, 如何平衡成本与性能、环保与效益, 将是未来研究和应用的重点方向。

参考文献:

- [1] 王秋利, 越海涛, 王利军. 大型 14Cr1MoR+NS1102 复合板压力容器制造工艺研究 [J]. 甘肃科技, 2019, 35 (03): 14-16.
- [2] 陈正楠. 金属材料热处理工艺用于机械制造中的思考 [J]. 冶金与材料, 2023, 43 (01): 154-156.
- [3] 王志光. 金属材料热处理变形问题及开裂问题的解决措施研究 [J]. 冶金与材料, 2022, 42 (04): 39-41.
- [4] 陆云, 陈强, 郭忠晓, 朱凯丽, 洪端华. 金属材料热处理工艺在机械制造中的应用 [J]. 南方农机, 2022, 53 (14): 163-165.
- [5] 周永浪, 王官涛, 王立军, 刘春明. 热处理工艺对高成型性 0.1%C-3%Mn 中锰钢组织和性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2022, 36 (05): 343-352.