

金属材料热处理变形的影响因素与控制

尚国墙 马永泉

山东电力工业锅炉压力容器检验中心有限公司 山东 济南 250003

摘要: 随着工业进步,热处理成为调整金属材料性能的关键手段,由于现阶段热处理工艺还不够成熟,金属材料在热处理过程中极易发生变形,降低了加工成功率。鉴于此,深入研究热处理变形的影响因素及控制策略至关重要。本文探讨金属材料热处理变形的主要影响因素,并提出针对性控制策略,旨在为工业生产提供科学依据与实践指导,促进热处理技术的优化与应用。

关键词: 金属材料;热处理;变形;影响因素;控制策略

引言:金属材料热处理是通过加热、保温和冷却等一系列工艺过程,改变金属材料的晶体结构和性能,以达到提高材料强度、硬度、耐磨性、耐腐蚀性等目的的一种技术。然而,在热处理过程中,金属材料往往会发生变形,这不仅影响工件的尺寸精度和形状精度,还可能导致工件报废,增加生产成本。因此,研究金属材料热处理变形的影响因素及控制策略,对于提高产品质量、降低生产成本具有重要意义。

1 金属材料热处理概述

金属材料热处理是一种通过加热、保温和冷却等工艺手段,改变金属材料内部组织结构,从而提升其物理、化学及机械性能的工艺过程。作为材料科学与工程领域的重要组成部分,热处理技术对于提高金属材料的强度、硬度、韧性、耐腐蚀性以及耐磨性等关键性能具有至关重要的作用。热处理工艺的历史悠久,随着人类文明的进步和科学技术的发展,其技术水平和应用范围也在不断扩大。从最初的简单加热和淬火,到如今的多种热处理技术和设备的广泛应用,热处理技术已经发展成为一门涉及物理学、化学、材料学等多学科交叉的综合性技术。在热处理过程中,金属材料首先被加热到预定的温度,使其内部原子活动增强,组织结构发生变化。这一步骤通常称为加热阶段,加热温度和加热速度的选择对于后续的组织转变和性能提升具有重要影响^[1]。随后,在保温阶段,金属材料在预定温度下保持一段时间,以确保其内部组织结构达到预期的均匀状态。最后,在冷却阶段,通过快速或缓慢冷却的方式,使金属材料获得所需的组织结构和性能。

2 金属材料热处理变形的影响因素

2.1 温度

在加热过程中,金属材料的晶体结构发生变化,其塑性也会发生改变。适当的加热温度可以提高金属的塑

性,有利于热处理变形的进行。然而,加热温度过高会导致金属材料的过热,产生过大的热应力和组织应力,从而导致变形加剧。相反,加热温度过低则可能导致金属材料的结构和性能不能充分改善,无法达到预期的热处理效果。

2.2 变形速率

变形速率是指金属材料在热处理过程中的变形速度。变形速率过快会导致金属材料的应变速率过大,从而产生过大的内应力和应变不均匀。这种不均匀的应变会导致金属材料在冷却过程中发生不均匀的收缩或膨胀,从而产生变形。

2.3 冷却方式

冷却方式也是影响金属材料热处理变形的重要因素。不同的冷却方式会导致金属材料的组织结构和性能发生变化。快速冷却可以产生细小的晶体结构,提高金属材料的强度和硬度,但也可能导致金属材料内部产生过大的残余应力和组织应力,从而引起变形。相反,慢速冷却可以通过相变调节金属材料的组织和性能,减少残余应力和组织应力的产生,但也可能导致金属材料发生相变不完全或组织成分分布不均匀等问题。

2.4 金属化学成分

金属材料的化学成分在热处理变形中至关重要,尤其是碳元素与合金元素的影响尤为显著。碳元素作为影响金属热处理变形的主要因素,其含量的变化会直接导致金属在受热过程中的形变特性发生改变。具体而言,碳元素含量的增减会影响马氏体的比容及钢的 A_s 点(奥氏体开始转变为马氏体的临界温度),进而增加工件变形的风险。随着含碳量的上升,这种变形趋势愈发明显。合金元素同样对工件形变有着不可忽视的影响。它们在钢中以固溶体、合金渗碳体与合金碳化物等形式存在,这些形态强化了钢的力学性能,提高了塑性变形抗

力。然而，合金元素的引入也可能带来一些负面效应，如导致热处理过程中的相变不完全或组织成分分布不均等问题，这些问题都可能成为引发变形的潜在因素。

2.5 工件结构与尺寸

工件结构与尺寸对热处理变形有显著影响。长轴类工件，由于其几何特性，淬透后会形成马氏体组织，引发组织应力变形，导致工件体积膨胀，直径与长度均有所增加。相比之下，合金钢轴类工件因其较高的淬透性，变形情况更为复杂多变。对于环形套筒类等特殊形状工件，淬火后热应力分布不均，内外表壁承受压力而中心部分受拉，导致外径扩大、内径及高度收缩等变形问题。此外，工件的装夹方式亦不可忽视，不当的装夹易导致加热和冷却过程中受热不均，诱发额外的热应力和组织应力，进一步加剧工件变形。

2.6 热处理工艺参数

热处理工艺参数包括加热速度、加热温度、保温时间以及冷却速度等，这些参数的选择和控制在金属材料的热处理变形具有重要影响。加热速度过快会导致金属材料内部温度分布不均匀，产生过大的热应力；加热温度过高或保温时间过长则可能导致金属材料过热或组织成分分布不均匀；冷却速度过快则可能导致金属材料内部产生过大的残余应力和组织应力。

3 金属材料热处理变形的控制策略

3.1 控制加热温度

加热温度是热处理过程中的关键参数之一，对金属材料的变形具有直接影响。根据金属材料的特性和需求，选择合适的加热温度是控制热处理变形的重要措施。首先，应充分了解金属材料的热物理性能和相变规律，确定其加热温度范围。避免加热温度过高导致金属材料内部组织发生剧烈变化，从而产生过大的变形。也要防止加热温度过低，使金属材料无法达到预期的组织结构转变，影响热处理效果。其次，加热过程中应确保金属材料受热均匀。可以采用预热、缓慢加热或分段加热等方式，使金属材料在加热过程中温度分布更加均匀，减少因局部过热或冷却不均匀导致的变形。此外，加热设备的选择和使用也至关重要。应选用具有高精度温度控制功能的加热设备，并定期对设备进行维护和校准，以确保加热温度的准确性和稳定性。

3.2 控制变形速率

变形速率是影响金属材料热处理变形的重要因素，适当控制变形速率可以保证金属材料的均匀变形，减少变形的发生。在热处理过程中，应根据金属材料的塑性和变形形式合理控制变形速率。对于塑性较好的金属

材料，可以适当提高变形速率，以缩短热处理周期和提高生产效率。然而，对于塑性较差或具有复杂形状的金属材料，则应降低变形速率，以减少因应力集中和变形不均匀导致的变形问题。可以通过调整加热和冷却速率来控制变形速率。例如，在加热阶段采用缓慢加热的方式，使金属材料在加热过程中逐渐软化并均匀变形；在冷却阶段则可以采用分级冷却或等温淬火等方式，使金属材料在冷却过程中逐渐硬化并减少变形。

3.3 选择合适的冷却方式

冷却方式是影响金属材料热处理变形的另一个关键因素，选择合适的冷却方式对于控制金属材料热处理变形至关重要。快速冷却可以产生细小的晶体结构，提高金属材料的强度和硬度^[2]。然而，快速冷却也可能导致金属材料内部产生过大的残余应力和组织应力，从而增加变形的风险。因此，在选择冷却方式时，应根据金属材料的特性和需求进行综合考虑。对于需要高强度和高硬度的金属材料，如工具钢、模具钢等，可以采用快速冷却方式，如淬火。但需要注意淬火介质的选择和淬火工艺的优化，以减少变形和开裂等缺陷的发生。对于需要减少残余应力和组织应力的金属材料，如结构钢、不锈钢等，则可以采用慢速冷却或等温淬火等方式。这些方式可以使金属材料在冷却过程中逐渐释放应力并减少变形。

3.4 优化工件结构与尺寸设计

工件的结构与尺寸设计对于减少热处理变形也具有重要影响。在工件设计时，应尽量保持工件结构与材料成分和组织的对称性，以减少由于冷却不均引起的畸变。（1）避免在工件中设计过多的尖锐棱角、沟槽等结构特征。这些特征容易导致应力集中和变形倾向的增加。在可能的情况下，应采用圆角、倒角等过渡形式来减少应力集中和变形。（2）对于厚度不均匀的零件，可以采用预留加工量的方法。在热处理前进行预加工，使零件的厚度更加均匀，从而减少因厚度差异导致的变形。（3）在工件设计时还应考虑材料的热膨胀系数和收缩率等因素。通过合理设计工件的尺寸和形状，可以使其在热处理过程中受热或冷却更加均匀，从而减少变形。

3.5 采用合理的装夹方式与夹具

装夹方式与夹具的选择对于减少热处理变形也具有重要意义。在装夹过程中，应根据工件的结构和尺寸选择合适的装夹方式和夹具，以确保工件在加热和冷却过程中受热或冷却均匀。（1）应采用多点支撑和夹紧的方式。通过增加支撑点和夹紧点的数量和分布，可以使工件在加热和冷却过程中更加稳定，减少因变形而导致的尺寸变化。（2）可以采用补偿垫圈、支承垫圈等辅助工

具来减少工件在加热和冷却过程中的变形倾向。这些工具可以吸收部分热膨胀和收缩产生的变形量，从而降低工件的变形程度。（3）对于大型或复杂形状的工件，可以采用振动消除应力等方法来进一步减少变形。通过振动的方式使工件内部的残余应力得到释放和重新分布，从而降低工件的变形风险。

3.6 采用高精度热处理设备

高精度热处理设备具有温度控制精确、加热均匀等特点，可以显著提高热处理质量和减少变形。（1）高精度热处理设备具有先进的温度控制系统和加热装置。通过精确控制加热温度和加热速率，可以使金属材料在加热过程中更加均匀和稳定地发生组织结构转变，从而减少变形。（2）高精度热处理设备还具有先进的冷却系统和淬火装置。通过精确控制冷却速率和淬火介质的选择，可以使金属材料在冷却过程中更加均匀地释放热量和应力，从而减少变形和开裂等缺陷的发生。（3）定期对高精度热处理设备进行维护和校准也是确保热处理质量和减少变形的重要措施之一。通过定期检查和维修设备的各个部件和系统，可以确保设备的正常运行和准确性，从而提高热处理质量和减少变形。

3.7 实施热处理前的预处理

在热处理前对金属材料进行预处理也是减少变形的重要措施，（1）消除应力退火可以消除金属材料在加工过程中产生的残余应力。这些残余应力可能导致金属材料在热处理过程中发生变形或开裂等缺陷。通过消除应力退火可以使金属材料内部的应力得到释放和重新分布，从而降低其变形风险。（2）表面清理可以去除金属材料表面的油污、氧化物等杂质。这些杂质可能会影响金属材料的热处理和冷却过程，从而导致变形或开裂等缺陷的发生。通过表面清理可以使金属材料表面更加干净和光滑，提高热处理质量和减少变形。在实施预处理时，应注意选择合适的工艺参数和设备^[1]。例如，在消除应力退火过程中应控制退火温度和保温时间等参数；在表面清理过程中应选择合适的清理方法和设备。还应根据金属材料的特性和需求进行综合考虑，以确定最佳的

预处理方案。

3.8 采用先进的热处理技术

随着科技的不断发展，越来越多的先进热处理技术被应用于工业生产中。这些技术具有高效、节能、环保等特点，可以显著提高热处理质量和减少变形。（1）真空热处理技术是一种先进的热处理技术。它可以在无氧或低氧环境下进行热处理作业，避免金属材料在加热和冷却过程中发生氧化和脱碳等问题。通过真空热处理技术可以获得更加均匀和稳定的组织结构转变，从而减少变形和开裂等缺陷的发生。（2）离子渗氮技术也是一种先进的热处理技术。它可以在金属材料表面形成一层致密的氮化物层，提高金属材料的硬度和耐磨性。通过离子渗氮技术可以改善金属材料的表面性能，减少因磨损和腐蚀而导致的变形和失效。（3）激光热处理技术也是一种具有广阔应用前景的先进热处理技术。它可以对金属材料进行局部快速加热和冷却作业，实现精确控制热处理变形等目的。通过激光热处理技术可以对金属材料进行精确的温度控制和组织结构转变控制，从而获得更加优异的机械性能和表面质量。

结语

金属材料热处理变形是一个复杂而重要的问题，涉及多个影响因素和控制策略。本文探讨了金属材料热处理变形的影响因素，并提出了相应的控制策略。通过合理选择和控制这些因素，可以有效减少金属材料热处理变形问题，提高产品质量和生产效率。未来，随着科技的不断进步和工业生产需求的不断变化，金属材料热处理技术也将不断发展和创新。

参考文献

- [1]李晋.金属材料热处理变形的影响因素及控制策略[J].现代盐化工,2022,49(01):56-57.
- [2]王金林,梁小东,唐冬梅,等.浅析金属材料热处理变形及开裂问题[J].机械工业标准化与质量,2024(6):42-45.
- [3]邹镠.金属材料热处理变形的控制措施[J].冶金与材料,2022,42(6):116-118.