

# 压力容器设计制造中的热处理问题分析

刘彦凤

江西制氧机有限公司

**摘要：**本文就压力容器设计制造中的热处理问题展开了深入分析。首先，介绍了热处理技术的原理，探讨了其在压力容器制造中的必要性和目的。随后，细致地讨论了不同类型的热处理及其各自的作用，以及适用于焊后热处理的条件。在接下来的部分中，深入研究了不同类型的 $\text{Fe-Cr-Ni}$ 不锈钢，包括铁素体不锈钢、奥氏体不锈钢和铁素体-奥氏体双相不锈钢的热处理特点。最后，总结了压力容器设计制造中的热处理问题，并强调了其在确保安全性和性能方面的重要性。通过这一综合分析，可以更好地理解在压力容器制造中如何有效应用热处理技术以确保最终产品的质量 and 可靠性。

**关键词：**热处理技术；压力容器；焊后热处理

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6288.2023.09.103

## 一、热处理技术所应用的原理

热处理技术是一种关键的材料工程工艺，其原理基于材料科学和热力学的基本概念，旨在通过精确控制材料的温度和时间，以改变其内部结构和性能。这一技术的应用范围广泛，特别在容器的设计和制造中具有重要意义。

热处理可以引起晶体结构的变化，包括晶粒大小、晶格排列和晶体缺陷的调整。这是通过加热和冷却过程中原子或分子的迁移和重新排列来实现的，从而影响材料的性能。冶金相变是热处理的关键原理之一，许多金属和合金在不同温度下会发生不同的相变，例如固溶体、时效硬化和回火等，通过精确控制这些相变，可以实现所需的性能调整，如提高强度、韧性和耐腐蚀性。此外，热处理还可以用于消除焊接和加工过程中引入的残余应力，通过均匀的加热和冷却来提高材料的稳定性。晶粒生长的控制也是热处理的一个关键原理，通过选择适当的加热和冷却速率，可以实现细小晶粒或大晶粒材料的制备，以满足不同工程需求。最后，热处理还可以用于调整材料的非均匀性，确保在制造过程中获得一致的性能。

## 二、压力容器焊后热处理的必要性和目的

焊接过程中产生的残余应力可能对容器的安全性和可靠性构成严重威胁。这些应力可能导致应力集中、开裂或变形，从而降低容器的强度和耐久性。因此，焊后热处理通过均匀加热和冷却的过程有助于有效地消除这些残余应力，提高容器的稳定性，确保其在长期使用中不会发生失效。焊接过程中可能导致材料受到氢的侵蚀，进而引发氢开裂问题，严重影响容器的完整性。通过焊后热处理，可以减少材料中的氢含量，提高其抗氢开裂性，从而减少容器在使用中发生脆性破坏的风险。这一步骤对于确保容器在高压环境下的安全性至关重要。此外，焊接过程可能导致材料的组织和性能发生变

化，如晶粒粗化或冷却速率不均匀。焊后热处理通过控制温度和时间，重新调整材料的晶体结构，以实现所需的力学性能、硬度和韧性。这有助于确保容器在各种工作条件下都能保持稳定的性能。另外，焊接可能会导致材料失去部分的耐腐蚀性，因此焊后热处理也可以用于改善材料的耐腐蚀性能，确保容器在不同环境条件下的长期使用。最后，焊后热处理不仅有技术层面的必要性，还在法规和标准方面有明确的要求。在许多国家和地区，热处理是法规或标准规定的步骤，以确保容器的质量和安全，不遵守这些要求可能会导致法律责任和安全风险。

## 三、热处理的种类和作用

热处理是一种通过控制材料的温度和时间来改变其内部结构和性能的工艺。它可以分为多种种类，每种种类都有不同的作用和应用。以下是常见的热处理种类及其作用：

(1) 退火 (Annealing)：加热材料至其临界温度，然后缓慢冷却的过程。它的主要作用是减轻残余应力、改善材料的韧性和可加工性、调整材料的硬度，以及消除冷加工过程中引入的晶体缺陷。

(2) 正火 (Normalizing)：将材料加热至超过临界温度后，空气冷却至室温的处理。它的作用是材料的强度和硬度，同时保持一定的韧性。

(3) 淬火 (Quenching)：将材料迅速冷却，使其具有高强度和硬度的过程。这通过快速固化材料的晶体结构来实现，但也会使材料变得脆性。通常需要后续的回火来提高韧性。

(4) 回火 (Tempering)：在淬火后将材料重新加热，然后冷却的过程。它的主要作用是降低材料的硬度，同时提高韧性和耐腐蚀性。这有助于平衡强度和韧性之间的关系。

(5) 时效处理 (Aging)：将材料在适当的温度下

保持一段时间，以改善其性能。它通常用于高强度合金，以提高强度和硬度，同时保持一定的韧性。

(6) 固溶处理 (Solutionizing)：将合金加热至临界温度，以使溶解在晶体中的元素均匀分布。它通常用于合金材料，以提高其强度、耐腐蚀性和其他性能。

(7) 等温淬火 (Isothermal Quenching)：材料达到临界温度后将其保持在恒定温度下进行淬火，以获得特定的组织和性能，通常用于特殊合金材料。

#### 四、需进行焊后热处理的条件

焊后热处理的必要性取决于多个因素的综合影响。第一，材料类型是一个关键的决定因素。特殊合金、不锈钢、奥氏体不锈钢和铝合金等材料通常需要焊后热处理，以调整其性能并消除可能产生的应力。第二，材料厚度也会影响是否需要热处理，因为较厚的材料在焊接过程中可能会产生较高的残余应力。焊接方法也是一个重要的考虑因素，某些高能量密度的焊接方法可能引入较高的热输入，导致材料的组织和性能发生变化，因此需要热处理来恢复其稳定性。第三，焊接过程中的应力情况也需要考虑，局部热应力和残余应力可能导致裂纹或形状变形，需要热处理来消除这些应力。应用要求在决定是否进行焊后热处理时也发挥关键作用。如果最终产品需要具有高强度、韧性、耐腐蚀性或其他特定性能，那么热处理可能是不可或缺的，以满足这些要求。最后，法规和标准的遵守也是重要的，一些法规、行业标准或客户规范可能要求在特定情况下进行焊后热处理，以确保产品的合规性和安全性。

#### 五、压力容器设计制造中的热处理问题

##### (一) 不锈钢及其热处理

##### 1. 铁素体不锈钢

铁素体不锈钢是一类具有铁素体晶体结构为主要特征的不锈钢合金，通常合金化元素包括铬、硅、锰、钼等。这一类不锈钢材料以其在干燥气氛和某些酸性介质下的优异耐腐蚀性能而广泛应用，然而，需要特别注意的是在含氯离子的盐水环境中，铁素体不锈钢容易受到点蚀 (pitting) 和应力腐蚀裂纹 (stress corrosion cracking) 的影响。

在压力容器制造过程中，铁素体不锈钢的热处理是确保其性能、强度和耐腐蚀性的关键步骤。以下是涉及铁素体不锈钢的热处理问题的详细内容：

(1) 退火 (Annealing)：退火是铁素体不锈钢热处理的常见步骤之一。在焊接或冷加工后，材料可能会存在残余应力和组织不均匀。通过退火，可以将材料加热至适当的温度，然后缓慢冷却，以消除这些残余应力并调整晶体结构。退火可以提高材料的韧性、可加工性和耐腐蚀性。

(2) 回火 (Tempering)：回火是通过将退火后的材料重新加热并冷却来实现的，目的是降低硬度，提高韧性，同时减少应力腐蚀裂纹的风险。回火的温度和时间参数需要根据具体的应用和性能要求来确定。

(3) 淬火 (Quenching)：虽然铁素体不锈钢通常不需要淬火来提高硬度，但在某些特殊情况下，如需要特定的强度和硬度时，淬火可能会应用。然而，淬火需要严格控制冷却速度，以避免变形和晶界腐蚀等问题。

(4) 热处理参数控制：在进行热处理时，需要精确控制温度、保温时间和冷却速度。这些参数的选择取决于不锈钢的成分、焊接过程和最终产品的要求。温度过高或保温时间不足可能导致性能不达标，而温度过低则可能无法实现所需的性能改善。

##### 2. 奥氏体不锈钢

在压力容器的设计和制造过程中，不锈钢材料是常用的选择之一，而奥氏体不锈钢作为不锈钢家族中的重要代表，其热处理问题至关重要。奥氏体不锈钢以其奥氏体晶体结构为主要特征，通常由铬和镍等合金元素构成，具有出色的耐腐蚀性和机械性能。以下是涉及奥氏体不锈钢的热处理问题的详细内容：

(1) 固溶处理 (Solution Annealing)：奥氏体不锈钢在制造压力容器前通常需要进行固溶处理，这是一个关键的热处理步骤。固溶处理旨在将合金元素均匀溶解在奥氏体晶体结构中，从而提高材料的强度和耐腐蚀性。该过程通常包括将材料加热至固定温度，然后迅速冷却，以保持奥氏体的晶体结构。

(2) 冷却速率控制：在固溶处理后，冷却速率的控制至关重要。过快的冷却可能导致晶界腐蚀或组织不均匀，因此需要在固溶处理后适度冷却，以确保材料的性能和结构不受损。

(3) 硬化和回火：在某些情况下，奥氏体不锈钢需要进一步的热处理步骤，如硬化和回火，以调整其机械性能。硬化通过快速冷却来增加材料的硬度，而回火则用于提高韧性和降低硬度。

(4) 不锈钢焊接问题：在压力容器制造中，通常需要进行焊接，而不锈钢的焊接问题也需要考虑。焊接过程中产生的热影响区域需要经过适当的热处理来消除残余应力，并确保焊接接头的性能达到要求。

(5) 低温应用：对于在低温条件下使用的压力容器，奥氏体不锈钢的低温冷脆性是一个关键问题。合适的热处理和材料选择可以改善不锈钢在低温下的韧性和耐腐蚀性。

在所有这些热处理步骤中，精确的温度控制、保温时间和冷却速度都是至关重要的。这些参数的选择必须根据具体的不锈钢成分、制造过程和最终产品的要求来

确定,以确保压力容器的质量、性能和安全性。

### 3. 铁素体—奥氏体双相不锈钢

在压力容器的设计和制造中,不锈钢是常用的材料之一,而铁素体—奥氏体双相不锈钢是不锈钢家族中的一类特殊材料,其热处理问题具有独特性。铁素体—奥氏体双相不锈钢是因其复杂的组织结构而著称,其中既包含铁素体又包含奥氏体,通常由铬、镍、钼等合金元素构成。

(1) 固溶处理和析出硬化:铁素体—奥氏体双相不锈钢通常需要进行固溶处理,以确保合金元素在整个材料中均匀溶解,提高其强度和耐腐蚀性。固溶处理后,材料需要进行快速冷却,然后在低温条件下进行析出硬化。这一过程旨在通过在晶界和奥氏体中形成弥散的硬质颗粒来提高材料的硬度和强度。

(2) 热处理参数控制:精确的温度控制和保温时间对于铁素体—奥氏体双相不锈钢的热处理至关重要。温度过高或保温时间不足可能导致合金元素的不均匀分布,从而影响材料的性能。因此,在热处理过程中需要根据具体的合金成分和要求,精确控制这些参数。

(3) 焊接和热影响区:在压力容器的制造过程中,通常需要进行焊接,而铁素体—奥氏体双相不锈钢的焊接问题需要特别关注。焊接会产生高温热影响区,可能导致组织和性能的变化,因此需要适当的焊后热处理来消除残余应力并确保焊接接头的性能稳定。

(4) 耐腐蚀性:铁素体—奥氏体双相不锈钢的耐腐蚀性能在压力容器中至关重要。通过合适的热处理和合金设计,可以实现材料对于多种腐蚀介质的出色抵抗能力,确保容器在恶劣环境下的长期稳定运行。

(5) 低温应用:对于在低温条件下使用的压力容器,铁素体—奥氏体双相不锈钢需要具备足够的韧性和耐低温冷脆性。适当的热处理和合金设计可以改善材料在低温环境下的性能。

### (二) 压力容器焊后热处理

焊后热处理在压力容器制造中扮演着至关重要的角色,其重要性不可低估。这个过程的首要目标是提高焊接接头的性能,以确保压力容器在实际运行中能够安全可靠地承受内外部的压力和环境条件。焊接引入了高温区域和急速冷却,这可能会导致焊接接头出现不均匀的组织和性能,因此需要通过热处理来调整和优化这些区域的材料特性。

第一,焊后热处理的关键步骤之一是固溶处理。这个过程旨在将合金元素均匀地溶解在晶体结构中,从而提高焊接区域的强度和耐腐蚀性。在固溶处理中,焊接接头被加热到特定的温度,使合金元素均匀分布在晶体结构中。然后,通过控制冷却速度,确保所需的晶体

结构得以保持。第二,焊后热处理包括回火过程。回火旨在降低焊接区域的硬度,提高其韧性,并减轻焊接过程中产生的残余应力的影响。通过将焊接接头重新加热到适当的温度,然后控制冷却速度,可以实现所需的性能调整,以确保焊接接头在实际使用中不易破裂或变形。第三,降温速率的控制焊后热处理中也占有重要地位。过快的冷却可能导致焊接区域的晶体结构变得不均匀,从而引发裂纹或其他损伤。因此,降温速率必须适度,以避免不必要的损害。最后,焊后热处理有助于消除焊接过程中引入的残余应力,提高焊接接头的稳定性。此外,它还改善了焊接接头的耐腐蚀性能,确保在恶劣环境中长期使用下保持其性能和安全性。

### 六、结束语

在压力容器的设计和制造过程中,热处理问题是确保最终产品性能和安全性关键环节。通过精心规划和控制热处理过程,可以优化材料的组织和性能,以满足不同工作环境下的需求。不锈钢及其热处理、奥氏体不锈钢和铁素体—奥氏体双相不锈钢的热处理问题都涉及复杂的工程挑战,需要严格遵循工业标准和法规,确保制造出安全可靠的压力容器。

在焊后热处理中,固溶处理、回火、降温速率控制和应力消除等步骤的精确执行是不可或缺的。这些步骤有助于提高焊接接头的强度、韧性和耐腐蚀性,同时减轻残余应力的影响,确保了压力容器的可靠性。而对于不同类型的不锈钢,如奥氏体不锈钢和铁素体—奥氏体双相不锈钢,热处理策略需要根据其特殊的合金成分和应用需求进行调整。最终,通过正确的热处理,我们能够确保压力容器在各种工作环境下表现出色,保护了人员和环境的安全。因此,研究和实践压力容器热处理技术是制造业的重要任务之一,它不仅推动了工程技术的进步,还为各行各业提供了安全可靠的设备和系统,为社会的发展和进步做出了积极贡献。

### 参考文献

- [1] 郑顺城. 化工压力容器设计及不安全因素的研究[J]. 化工管理, 2022 (26): 138-140.
- [2] 龙亮, 胡齐贤, 罗云等. 大型焊接容器局部热处理防畸变工装优化设计[J]. 金属热处理, 2022, 47 (03): 234-238.
- [3] 于瑞琪. 压力容器设计中的热处理[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42 (04): 95-96.
- [4] 郭潇, 王智聪, 陈建超. 低温压力容器用SA537 CL2钢板的开发[J]. 轧钢, 2021, 38 (04): 108-111.
- [5] 王春艳. 浅议压力容器设计中的常见问题及对策[J]. 中国设备工程, 2021 (05): 106-107.