

核电压力容器 ASME 规范焊接质量控制研究

晏聪

上海核工程研究设计院股份有限公司，上海，200233；

摘要：本文深入探讨了 ASME 规范对核电压力容器焊接质量控制的要求，以及核电压力容器焊接质量控制的关键技术和应用。分析了 ASME 规范在多个方面的具体要求。接着阐述了焊接材料质量控制、焊接工艺优化、焊接过程自动化与智能化以及焊接接头无损检测与评估等关键技术。结合 ASME 规范讨论了核电压力容器焊接质量控制的具体应用，为核电工业的安全稳定运行提供了有力保障。

关键词：ASME 规范；核电压力容器；焊接质量控制；焊接工艺

DOI：10.69979/3041-0673.24.12.016

引言

核电压力容器作为核电工业中的核心设备，其焊接质量控制至关重要。ASME 规范作为国际公认的核电设备设计与制造标准，对核电压力容器焊接质量控制提出了严格的要求。本文旨在通过深入分析 ASME 规范的相关要求，探讨核电压力容器焊接质量控制的关键技术和应用，为核电工业的安全发展提供理论支持和实践指导。

1 ASME 规范对核电压力容器焊接质量控制的要求

1.1 焊接材料的选择

ASME 规范对核电压力容器焊接材料的选择提出了极高的要求，以确保焊接接头的质量和可靠性。焊接材料的选择必须基于材料的类型、强度、韧性、耐腐蚀性以及服役条件等多个因素进行综合考虑。在核电环境中材料不仅要承受高温高压，还要抵御辐射和腐蚀的侵蚀，因此材料的化学成分、力学性能和焊接性成为选择的关键。ASME 规范将焊接材料按其化学成分、力学性能和焊接性进行分类，将合金成分相近、强度级别和焊接性接近的材料归入一类并标以特定的分类号^[1]。这种分类方法大大减少了无实际意义的重复评定，提高了工作效率。例如碳钢和合金钢焊接填充金属可以按材料的类别、合金成分、强度等级和品种等归类，从而简化了焊接工艺评定的过程。

1.2 焊接工艺的制定

ASME 规范对核电压力容器焊接工艺的制定同样提出了严格的要求。焊接工艺的选择必须基于材料的类型、壁厚、使用条件等因素进行，以确保焊接接头的质量符合要求。在确定焊接工艺时必须考虑到不同种类的焊接方法对焊接接头质量的影响，以及如何保证焊接接头的质量和可靠性。焊接工艺的制定包括焊接方法的选择、

焊接参数的设定、焊接顺序的安排以及焊接接头的设计等。ASME 规范规定了多种适用于核电压力容器的焊接方法，如气焊、焊条电弧焊、埋弧焊、熔化极气体保护焊、钨极气体保护焊等^[2]。在实际应用中需要根据材料的特性和焊接要求选择最合适的焊接方法。焊接参数的设定也是焊接工艺制定的重要环节。焊接参数包括焊接电流、电压、焊接速度、预热温度等，这些参数的设定直接影响焊接接头的质量和性能。ASME 规范要求在进行焊接工艺评定试验时必须对各种焊接参数进行严格的控制和调整，以确保焊接接头的质量和可靠性。

1.3 焊接过程的控制

在核电压力容器的焊接过程中 ASME 规范对焊接过程的控制提出了严格的要求。焊接过程控制包括焊接前的准备、焊接过程中的监控以及焊接后的处理等多个环节。焊接前的准备工作包括焊接材料的准备、焊接设备的检查、焊接接头的清洁和预热等。ASME 规范要求焊接材料必须符合规范要求并进行适当的质量控制。焊接设备必须处于良好的工作状态，以确保焊接过程的稳定性和可靠性。焊接接头在焊接前必须进行彻底的清洁和预热，以去除表面的污染物和减少焊接应力。在焊接过程中 ASME 规范要求对焊接参数进行实时监控和调整，以确保焊接接头的质量和性能。还需要对焊接过程中的温度、压力、气体流量等参数进行严格的控制，以防止焊接缺陷的产生。焊接完成后 ASME 规范要求对焊接接头进行后处理，包括焊缝的清理、焊后热处理和应力消除等。这些处理措施可以进一步提高焊接接头的质量和可靠性，减少焊接缺陷的产生。

1.4 焊接接头的检验和试验

ASME 规范对核电压力容器焊接接头的检验和试验提出了严格的要求。焊接接头的检验和试验是确保焊接质量的重要环节，包括外观检查、尺寸检查、无损检测

和破坏性试验等多个方面。外观检查是焊接接头检验的第一步,通过目视或放大镜等工具对焊缝表面进行检查,以发现焊缝表面的缺陷和瑕疵。尺寸检查则是通过测量焊缝的尺寸和形状来评估焊缝的符合性。无损检测是焊接接头检验的重要手段之一,包括 X 射线检测、超声波检测、磁粉检测和渗透检测等多种方法。无损检测可以在不破坏焊缝的情况下发现焊缝内部的缺陷和裂纹,从而确保焊接接头的质量和可靠性。破坏性试验则是通过取样并进行拉伸试验、冲击试验、弯曲试验等力学性能测试来评估焊接接头的强度和韧性。这些试验可以进一步验证焊接接头的质量和可靠性,确保核电压力容器在长期使用中的安全性和可靠性。

2 核电压力容器焊接质量控制的关键技术

2.1 焊接材料的质量控制

焊接材料的质量控制涉及多个环节,从原材料的采购、储存、使用到最终的质量评估,每一步都需要严格的监管和控制。在采购环节必须选择符合 ASME 或其他相关国际标准的焊接材料。这些材料需要经过严格的化学成分分析和力学性能测试,确保其满足核电压力容器对强度、韧性、耐腐蚀性等性能的要求。还需要对供应商的资质进行审查,确保其具备生产高质量焊接材料的能力和信誉。在储存和使用环节,焊接材料必须保持干燥、清洁并避免与有害物质接触。对于易受潮、易氧化的材料,还需要采取特殊的保护措施^[3]。焊接材料的使用也需要遵循严格的规范,包括焊条的烘烤、焊丝的选用、焊剂的配比等,以确保焊接过程中材料的性能得到充分发挥。在质量评估环节需要对焊接材料进行全面的检测和分析。这包括化学成分的定量分析、力学性能的测试以及微观组织的观察等。通过这些检测手段可以及时发现焊接材料中的缺陷和问题,从而采取相应的措施进行改进和修复。

2.2 焊接工艺的优化

焊接工艺的优化涉及多个方面,包括焊接方法的选择、焊接参数的设定、焊接顺序的安排以及焊接接头的设计等。在选择焊接方法时需要根据焊接材料的类型、厚度以及焊接接头的形状和尺寸等因素进行综合考虑。不同的焊接方法具有不同的特点和适用范围,因此必须选择最适合的焊接方法以确保焊接接头的质量。在设定焊接参数时需要考虑多个因素的综合影响,包括焊接电流、电压、焊接速度、预热温度等。这些参数的设定对焊接接头的性能具有重要影响,因此需要进行严格的试验和优化。通过调整这些参数可以获得最佳的焊接效果,提高焊接接头的强度和韧性。在安排焊接顺序时需要遵循一定的原则,如先焊收缩量大的焊缝、后焊收缩量小

的焊缝;先焊短焊缝、后焊长焊缝等。这些原则有助于减少焊接变形和残余应力,提高焊接接头的质量。在设计焊接接头时需要充分考虑接头的形状、尺寸以及受力情况等因素。通过合理的接头设计可以优化焊接接头的受力状态,提高其承载能力和耐久性。

2.3 焊接过程的自动化和智能化

自动化和智能化技术可以实现对焊接过程的精确控制和实时监测,从而提高焊接接头的质量和可靠性。在焊接自动化方面,通过采用机器人焊接、自动化焊接设备等手段可以实现对焊接过程的精确控制。这些设备具有高精度、高效率、高稳定性等优点可以大大提高焊接接头的质量和生产效率。自动化焊接还可以减少人工操作带来的误差和不确定性,提高焊接过程的稳定性和可靠性。在焊接智能化方面,通过引入智能传感器、机器视觉等技术手段,可以实现对焊接过程的实时监测和数据分析。这些技术可以实时监测焊接过程中的温度、压力、电流等参数的变化情况,及时发现和处理焊接过程中的异常和故障。通过对焊接数据的分析和挖掘还可以对焊接过程进行优化和改进,进一步提高焊接接头的质量和可靠性。

2.4 焊接接头的无损检测与评估

无损检测与评估是确保核电压力容器焊接接头质量的重要手段。无损检测可以在不破坏焊接接头的前提下,对其内部和表面的缺陷进行检测和分析。常见的无损检测方法包括 X 射线检测、超声波检测、磁粉检测等。X 射线检测可以检测焊接接头内部的裂纹、夹渣等缺陷;超声波检测可以检测焊接接头内部的缺陷和厚度变化;磁粉检测则可以检测焊接接头表面的裂纹等缺陷。这些检测方法具有各自的特点和适用范围,需要根据实际情况进行选择和应用^[4]。在进行无损检测时需要遵循一定的标准和规范,以确保检测结果的准确性和可靠性。还需要对检测结果进行科学的分析和评估,以确定焊接接头的质量状况和存在的缺陷类型及程度。根据评估结果可以采取相应的措施进行修复和改进,以提高焊接接头的质量和可靠性。对于核电压力容器焊接接头的评估还需要考虑其长期服役过程中的性能变化。通过进行定期的检测和评估可以及时发现和处理焊接接头在使用过程中出现的问题和隐患,确保其长期安全可靠地运行。

3 ASME 规范下核电压力容器焊接质量控制的应用

3.1 焊接材料的选用与质量控制

ASME 规范对核电压力容器焊接材料的选用提出了严格的要求。焊接材料的选择不仅要满足材料的力学性

能和化学成分要求,还需考虑材料的焊接性、耐腐蚀性以及特定服役环境下的适应性。在选用焊接材料时需进行详细的化学成分分析和力学性能测试,确保其满足核压力容器对强度、韧性、抗疲劳性等方面的要求。质量控制方面,ASME 规范强调对焊接材料的全面监控和严格管理。这包括从原材料的采购、验收、储存、使用到最终的质量评估等各个环节。在采购环节需对供应商进行资质审查,确保其生产能力和产品质量符合规范要求。在储存和使用过程中需采取必要的措施防止材料受潮、污染或氧化,确保材料性能的稳定性。ASME 规范还要求对焊接材料进行定期的质量评估。这包括材料的化学成分、力学性能测试,以及微观组织的观察和分析。通过这些评估手段可以及时发现材料中的潜在缺陷,从而采取相应的措施进行修复或更换,确保焊接接头的质量。

3.2 焊接工艺的制定与优化

ASME 规范对核压力容器焊接工艺的制定与优化提出了详细的要求和指导。焊接工艺的制定需综合考虑材料的类型、厚度、焊接接头的类型以及服役条件等多个因素。在工艺制定过程中需进行详细的焊接性试验和工艺评定,以确定最佳的焊接参数和工艺方法。优化焊接工艺是提高焊接接头质量的重要手段。ASME 规范鼓励采用先进的焊接技术和工艺方法,如窄间隙焊接、多层多道焊等,以提高焊接效率和接头质量。还需对焊接过程中的温度、压力、电流等关键参数进行实时监控和调整,确保焊接过程的稳定性和可控性^[5]。ASME 规范还强调对焊接工艺进行持续改进和优化。通过收集和分析焊接过程中的数据和信息可以发现潜在的工艺问题和缺陷,从而采取相应的措施进行改进和优化,提高焊接接头的质量和可靠性。

3.3 焊接过程的自动化与智能化

随着自动化和智能化技术的不断发展,ASME 规范也开始关注焊接过程的自动化与智能化。自动化焊接可以显著提高焊接效率和接头质量,减少人为因素对焊接过程的影响。智能化焊接则可以通过实时监测和分析焊接过程中的数据和信息,实现对焊接过程的精确控制和优化。ASME 规范鼓励采用先进的自动化和智能化焊接设备和技术,如机器人焊接、自动化焊接生产线等。这些设备和技术可以实现对焊接过程的精确控制和实时监测,提高焊接接头的质量和可靠性。ASME 规范还强调对自动化和智能化焊接设备进行定期维护和保养。通过定期对设备进行检修和校准可以确保设备的正常运行和精度要求,从而提高焊接接头的质量和可靠性。

3.4 焊接接头的无损检测与评估

ASME 规范对核压力容器焊接接头的无损检测与评估提出了严格的要求。无损检测可以在不破坏焊接接头的情况下,对其内部和表面的缺陷进行检测和分析。常见的无损检测方法包括 X 射线检测、超声波检测、磁粉检测等。ASME 规范要求对所有核压力容器焊接接头进行 100% 的无损检测。这不仅可以及时发现焊接过程中的缺陷和问题,还可以对焊接接头的质量进行准确的评估。通过无损检测可以确保焊接接头满足设计要求和相关标准的规定。ASME 规范还鼓励采用先进的无损检测技术和设备,如相控阵超声波检测、数字射线检测等。这些技术和设备可以实现对焊接接头的高精度检测和分析,提高检测的准确性和可靠性。ASME 规范还强调对无损检测数据进行科学分析和评估。通过收集和分析检测数据可以深入了解焊接接头的质量和性能状况,从而采取相应的措施进行改进和优化。这不仅可以提高焊接接头的质量,还可以为核压力容器的长期安全运行提供有力保障。

4 总结

本文通过对 ASME 规范下核压力容器焊接质量控制的要求、关键技术和应用进行深入探讨,揭示了核压力容器焊接质量控制的重要性和复杂性。ASME 规范为核压力容器焊接质量控制提供了全面的指导和要求,而关键技术则是实现这些要求的重要手段。

参考文献

- [1] 姚刚,王丹. 国内核电厂典型机组一回路在役检查规范切换研究[J]. 价值工程, 2024, 43(26):140-143.
 - [2] 陈明亚,於旻,刘晗,等. 热预应对反应堆压力容器材料断裂行为影响研究[J]. 化工机械, 2023, 50(1):40-44.
 - [3] 侍克献,田根起,王苗苗,等. 国产核电主管道用 316 LN 钢的低周疲劳性能评估[J]. 机械工程材料, 2023, 47(5):14-19,25.
 - [4] 叶新,朱序东,汤建帮,等. 反应堆压力容器厚壁焊缝的相控阵超声检测[J]. 无损检测, 2023, 45(7):65-69.
 - [5] 赵亮,雒晓辉,宋立,等. 核电厂核级安全阀抗震性能分析与研究[J]. 阀门, 2024(6):679-683.
- 作者简介: 晏聪(1985-3-21)男,汉族,籍贯:江西南昌、学历:硕士研究生,当前职称:工程师,主要工作/研究方向:核电主设备采购。