

风电塔筒焊接应力消除及提高疲劳强度的方法探析

李东

中国能源建设集团兰州电力修造有限公司 甘肃 730050

摘 要：风电塔筒焊接应力会影响其结构稳定性与疲劳强度。探讨了风电塔筒焊接应力消除及提高疲劳强度的方法，分析了不同应力消除手段的原理与效果，如热处理、振动时效等，同时阐述提高疲劳强度的途径，包括优化焊接工艺、改善结构设计等，为风电塔筒的可靠运行提供参考。

关键词：风电塔筒；焊接应力消除；疲劳强度提高；方法探析

引言：随着风电产业的快速发展，风电塔筒的质量与性能愈发重要。焊接应力会导致塔筒出现裂纹、变形等问题，降低其疲劳强度，影响使用寿命。因此，深入探析风电塔筒焊接应力消除及提高疲劳强度的方法，对于保障风电设备的安全稳定运行具有重要意义。

1. 风电塔筒焊接应力概述

1.1 焊接应力产生原因

风电塔筒在焊接过程中，由于多种因素会产生焊接应力。首先，焊接时不均匀的加热是产生焊接应力的主要根源。当对塔筒进行焊接时，焊缝区域被迅速加热，而周边区域仍处于相对较低的温度，这种温度差异导致材料热膨胀不均匀。焊缝处受热膨胀量大，但受到周边低温区域的限制，不能自由伸展，从而产生压应力；而周边区域则受到焊缝处膨胀的拉扯，产生拉应力。其次，焊接材料与母材的热物理性能差异也会引发应力。不同的材料具有不同的热膨胀系数、热导率等，在焊接过程中的热传导和变形行为不一致，进而产生应力。另外，焊接顺序不合理也会加剧应力的产生。如果焊接顺序杂乱无章，会使应力不断累积，无法得到有效释放。

1.2 焊接应力的分类

焊接应力可以从不同的角度进行分类。按照应力存在的时间，可分为瞬时应力和残余应力。瞬时应力是在焊接过程中，由于热循环的作用而产生的应力，随着焊接过程的结束，部分瞬时应力会得到释放，但仍有一部分会残留在焊件中，形成残余应力。残余应力是我们重点关注的对象，它会对塔筒的长期性能产生影响。根据应力作用的方向，焊接应力可分为纵向应力、横向应力和厚度方向应力。纵向应力是沿着塔筒焊缝长度方向的应力，主要是由焊缝纵向收缩引起的；横向应力垂直于焊缝长度方向，与焊缝的横向收缩以及纵向应力的相互作用有关；厚度方向应力则是

在塔筒壁厚方向上的应力，这种应力相对复杂，与焊接过程中的热量在壁厚方向的分布不均匀以及材料的层状结构等因素有关。从应力的性质来看，焊接应力又可分为拉应力和压应力，拉应力使材料有被拉长的趋势，而压应力则使材料有被压缩的趋势，在风电塔筒中，拉应力往往更容易导致裂纹的产生和扩展。

2. 焊接应力消除方法

2.1 热处理法原理与应用

热处理法是消除风电塔筒焊接应力的一种重要方法，其原理基于材料的热学性能。当对塔筒进行热处理时，通过加热整个焊件或焊件的特定区域到一定温度，然后缓慢冷却。在加热过程中，材料内部的原子获得足够的能量，原子间的结合力发生变化，晶格结构得到调整。对于焊接区域，这种热作用可以使原本因焊接而产生的不均匀应力状态重新分布。焊缝及其附近区域的残余应力在加热过程中逐渐松弛，因为在高温下，材料的屈服强度降低，原本处于高应力状态的部位能够通过局部的塑性变形来调整应力分布。在冷却过程中，由于是缓慢冷却，材料能够以较为均匀的方式收缩，从而避免了新的应力产生。在应用方面，热处理法需要根据塔筒的材料、尺寸和焊接工艺等因素确定合适的热处理参数。例如，对于不同的钢材，其相变温度有所不同，因此加热温度必须严格控制在合适的范围内，以确保达到消除应力的效果，同时又不会对材料的性能产生不利影响。而且，加热速度和冷却速度也需要精心调整，过快的加热或冷却可能会导致材料内部产生新的热应力。

2.2 振动时效法的特点

振动时效法是一种高效且节能环保的焊接应力消除方法。它的主要特点在于利用振动能量来调整焊件内部的残余应力。在风电塔筒上施加周期性的振动载荷时，塔筒内部的晶体结构会在振动能量的作用下发

生微观的位错运动。这种位错运动能够促使残余应力得到松弛和重新分布。与热处理法相比,振动时效法不需要对焊件进行加热和冷却,避免了因加热和冷却过程可能带来的材料组织变化和变形问题。它具有操作简便的优点,不需要大型的加热设备和复杂的冷却系统,只需要一台合适的振动时效设备即可。而且,振动时效法可以在焊件的任何工作状态下进行,无论是在车间内的半成品状态,还是已经安装在风电场的塔筒,只要能够安装振动时效设备并施加振动载荷就可以进行应力消除操作。此外,振动时效法的处理时间相对较短,能够快速地对焊件进行应力消除处理,提高生产效率。不过,振动时效法也有一定的局限性,它对于应力消除的效果可能不如热处理法彻底,尤其是对于一些应力较大、结构复杂的塔筒,可能需要多次振动时效处理才能达到较好的效果。

2.3 机械拉伸法的操作

机械拉伸法是通过对外部风电塔筒施加外部的机械拉伸力来消除焊接应力的方法。其操作过程首先需要根据塔筒的尺寸、材料性能和焊接情况确定合适的拉伸力大小。这个拉伸力不能过大,以免超过材料的屈服极限导致塔筒产生永久变形;也不能过小,否则无法有效地消除焊接应力。在确定拉伸力后,使用专门的拉伸设备,如液压拉伸机等,将拉伸力均匀地施加到塔筒的特定部位。通常是沿着焊缝方向施加拉伸力,因为焊缝是应力集中的主要区域。在施加拉伸力的过程中,塔筒内部的焊接应力会随着材料的局部拉伸而发生重新分布。原本处于高应力状态的焊缝区域在受到外部拉伸力后,应力逐渐降低,材料发生一定程度的塑性变形,从而使焊接应力得到释放。在拉伸过程中,需要密切监测塔筒的变形情况,以确保拉伸操作在安全范围内进行。机械拉伸法的优点是设备相对简单,操作较为直观,而且对于一些局部应力集中的区域能够有针对性地进行应力消除。但是,它也存在一些不足之处,例如对于较大尺寸的风电塔筒,要想均匀地施加拉伸力比较困难,可能会导致应力消除效果不均匀。

3. 提高疲劳强度的途径

3.1 优化焊接工艺参数

优化焊接工艺参数对于提高风电塔筒的疲劳强度具有关键意义。焊接电流、电压和焊接速度是重要的焊接工艺参数。合理调整焊接电流可以控制焊缝的熔深和熔宽。如果电流过大,会导致焊缝熔深过大,可

能会使焊缝根部出现过热现象,降低焊缝的韧性,从而影响塔筒的疲劳强度;反之,如果电流过小,焊缝可能会出现未焊透等缺陷,同样不利于疲劳强度的提高。焊接电压也需要与焊接电流相匹配,合适的电压能够保证电弧的稳定性,使焊缝成型良好。焊接速度的快慢直接影响焊缝的热输入量。如果焊接速度过快,焊缝冷却速度也会加快,可能会产生淬硬组织,这种组织比较脆,容易在疲劳载荷下产生裂纹;而焊接速度过慢,热输入量过大,会使焊缝晶粒粗大,也会降低疲劳强度。此外,焊接层数和层间温度的控制也不容忽视。合理的焊接层数能够保证焊缝的质量,层间温度过高或过低都会对焊缝的性能产生影响,合适的层间温度有助于细化焊缝晶粒,提高疲劳强度。

3.2 改善焊接接头设计

改善焊接接头设计是提高风电塔筒疲劳强度的有效途径之一。在设计焊接接头时,首先要考虑接头的形式。例如,采用对接接头相比于角接接头,在承受疲劳载荷时具有更好的性能。因为对接接头能够使应力在焊缝处均匀分布,减少应力集中现象。同时,对于对接接头的坡口形式也需要精心设计。合适的坡口形式,如V型坡口、U型坡口等,不仅能够保证焊缝的熔透性,还能减少焊接时的热输入量,从而改善焊缝的性能。此外,在焊接接头处增加过渡圆角也是一种常见的设计方法。过渡圆角能够有效地降低应力集中系数,当疲劳载荷作用于塔筒时,应力能够在圆角处得到平滑过渡,避免应力集中在尖锐的边角处。而且,在接头设计中,还可以考虑采用加强板等结构来提高接头的承载能力,但是要注意加强板的设计不能引入新的应力集中点。

3.3 采用表面强化处理

采用表面强化处理能够显著提高风电塔筒的疲劳强度。常见的表面强化处理方法有喷丸处理、滚压处理等。喷丸处理是利用高速弹丸冲击塔筒表面,使表面产生塑性变形。这种塑性变形会在表面形成一层残余压应力层。在疲劳载荷作用下,残余压应力能够抵消一部分拉应力,从而提高塔筒的疲劳强度。因为在疲劳过程中,拉应力是导致裂纹产生和扩展的主要因素,残余压应力的存在能够有效地抑制裂纹的产生。滚压处理则是通过滚压工具对塔筒表面进行滚压,使表面材料产生塑性流动,同样会形成残余压应力层。而且滚压处理还能够使表面材料得到细化,提高表面的硬度和耐磨性。表面强化处理的效果与处理参数密

切相关,如喷丸的弹丸直径、速度、喷射角度以及滚压的压力、滚压次数等。不同的塔筒材料和结构可能需要不同的处理参数来达到最佳的强化效果。

4. 方法的效果评估

4.1 应力消除效果检测

检测风电塔筒焊接应力消除效果对于确保塔筒质量至关重要。常用的检测方法有 X 射线衍射法、磁测法等。X 射线衍射法基于晶体材料对 X 射线的衍射原理。当 X 射线照射到塔筒材料上时,不同的应力状态会导致晶体的晶格间距发生变化,从而使 X 射线的衍射峰位置和强度发生改变。通过测量衍射峰的这些变化,就可以计算出材料内部的应力大小。这种方法具有精度高的优点,能够准确地检测出材料内部的残余应力,但是设备昂贵,操作复杂,需要专业的技术人员。磁测法是利用材料的磁性与应力之间的关系来检测应力。当材料存在应力时,其磁导率会发生变化,通过测量磁导率的变化来推断应力的变化。磁测法操作相对简便,设备成本较低,但是其检测精度相对 X 射线衍射法要低一些。在实际应用中,可以根据具体情况选择合适的检测方法,或者结合使用两种方法,以更全面、准确地评估应力消除的效果。

4.2 疲劳强度提升的衡量

衡量风电塔筒疲劳强度的提升是一个复杂的过程。首先,可以通过疲劳试验来直接评估。疲劳试验模拟塔筒在实际使用过程中的疲劳载荷情况,对经过处理后的塔筒试件进行多次循环加载,直到试件发生破坏。通过对比处理前后试件能够承受的循环加载次数,可以直观地了解疲劳强度的提升情况。例如,如果处理后的塔筒试件能够承受的循环加载次数比处理前增加了一定数量,就说明疲劳强度得到了提升。另外,也可以通过理论计算来评估疲劳强度的提升。基于材料的力学性能、焊接接头的设计以及应力状态等因素,利用疲劳强度计算模型,如 Goodman 图等,计算出处理前后塔筒的疲劳强度理论值,然后进行对比。但是理论计算往往需要一些假设条件,与实际情况可能存在一定的偏差,因此需要结合疲劳试验结果来综合评估疲劳强度的提升。

4.3 不同方法的对比分析

对风电塔筒焊接应力消除和提高疲劳强度的不同方法进行对比分析有助于选择最适合的方法。从应力消除效果来看,热处理法在消除应力方面通常能够达到较为彻底的效果,尤其是对于一些应力较大、结构

复杂的塔筒。振动时效法虽然操作简便、节能环保,但应力消除效果相对热处理法略逊一筹。机械拉伸法对于局部应力集中区域有较好的消除效果,但对于整体应力消除效果有限。在提高疲劳强度方面,优化焊接工艺参数、改善焊接接头设计和采用表面强化处理都有各自的优势。优化焊接工艺参数是从焊接过程入手,直接影响焊缝质量,从而提高疲劳强度;改善焊接接头设计主要是通过优化结构来减少应力集中,提高疲劳强度;采用表面强化处理则是在塔筒表面形成残余压应力层来抵抗疲劳载荷。不同的方法在成本、操作难度、适用范围等方面也存在差异。热处理法成本较高,需要专门的设备和场地,操作要求严格;振动时效法成本较低,操作简单,但可能需要多次处理;机械拉伸法设备简单,但操作时需要准确控制拉伸力。

结束语:综上所述,通过对风电塔筒焊接应力消除及提高疲劳强度方法的探析,明确了多种有效手段。合理运用这些方法,可显著降低焊接应力、提高疲劳强度。未来需进一步深入研究,结合实际需求优化方法,推动风电塔筒制造技术的不断进步。

参考文献

- [1] 王向影;孙畅;全志琦;刘宇劫;卿晓梅.风电机组塔筒内壁除锈机器人的设计.中国新技术新产品,2024(14)
- [2] 董立娟,于亚超,李慧芳,等.风电塔筒筒节吊装转运过程临时焊缝强度研究[J].起重运输机械,2020(9):36-41.
- [3] 郭平俊,朱锴年.海上风电大功率塔筒焊接工艺[J].机电产品开发与创新,2020(006):033.
- [4] 朱爵进.浅析风电塔筒焊接工艺的改进策略[J].中国机械,2024,(21):35-38.
- [5] 刘鹤.风电塔筒法兰焊接变形控制的工艺分析[J].技术与市场,2021,28(07):141-142.

作者简介:李东(1994-),男,汉族,甘肃兰州,学士,职位,中级工程师,研究方向:施工管理,质量控制,进度管理。