

抽水蓄能电站压力钢管焊缝残余应力对疲劳裂纹扩展速率影响研究

李文亮

甘肃省定西市安定区凤翔镇响河村 甘肃 定西 743000

【摘要】：抽水蓄能电站在调节电网负荷和提高电力供应的稳定性方面发挥着重要作用。压力钢管作为抽水蓄能电站的重要设备，对电站的安全稳定运行至关重要，其焊缝的残余应力对疲劳裂纹的扩展速率具有显著影响。残余应力通常是由于焊接过程中温度梯度不均和金属变形引起的，其分布和大小对管道的疲劳性能产生了深远影响。焊缝处的残余应力能够加速裂纹的萌生和扩展，从而缩短设备的使用寿命。了解压力钢管焊缝残余应力的分布及其对疲劳裂纹扩展速率的影响，能够为电站设计和安全评估提供重要依据。

【关键词】：抽水蓄能电站；压力钢管；焊缝；残余应力；疲劳裂纹扩展速率

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.016

引言

随着能源需求的不断增加，抽水蓄能电站作为一种重要的调峰电源，已经在全球范围内得到了广泛应用。压力钢管作为电站输水系统的核心部分，承载着巨大的水压和机械应力。在其制造过程中，焊接工艺不可避免地产生残余应力，这些应力不仅影响了钢管的承载能力，也可能导致疲劳裂纹的萌生和扩展。疲劳裂纹扩展速率与焊缝中的残余应力密切相关，焊缝处的残余应力可能成为裂纹扩展的催化剂。为确保抽水蓄能电站的安全性与稳定性，有必要深入研究压力钢管焊缝残余应力对疲劳裂纹扩展速率的影响。这项研究不仅有助于优化钢管焊接工艺，还为电站的安全评估和寿命预测提供了理论基础。

1 抽水蓄能电站压力钢管的工作原理与焊接工艺

1.1 抽水蓄能电站的功能与压力钢管的作用

抽水蓄能电站主要通过水泵和水轮机的双向作用调节电网负荷，具有高效的能量储存和调节能力。在电网负荷低时，抽水蓄能电站将多余电力用于将水从低位水库抽至高位水库，在电力需求高峰时，再将水从高位水库释放，通过水轮机发电，从而达到平衡电力供需的目的。压力钢管作为抽水蓄能电站中的重要输水管道，承担着承压输水的关键任务。其设计和制造必须确保具有足够的强度和耐疲劳性能，以应对高压、低温等复杂工况。在整个电站的运行过程中，压力钢管需要承受巨大的水流冲击和水压变化，因此其材质、焊接工艺及工艺中的残

余应力都会直接影响钢管的长期稳定性和安全性。焊接作为制造过程中不可避免的一环，对钢管的整体性能有着重要影响。

1.2 压力钢管焊接过程中的应力来源

在压力钢管的焊接过程中，温度的快速变化会导致金属的热膨胀和收缩，从而产生应力。由于不同区域的冷却速度不同，钢管内部的温差会引起热膨胀不均匀，这种不均匀膨胀导致了焊缝区、热影响区和母材之间的应力差异。焊接过程中，母材和焊缝的热膨胀系数不同，也会加剧焊接应力的产生。随着焊接温度的升高，焊缝周围区域的金属发生塑性变形，冷却过程中发生局部收缩，使得焊接区域产生残余应力。焊接顺序、焊接位置和热输入量等工艺参数也会影响焊接应力的分布。焊接应力的形成不仅与焊接过程中的温度分布有关，还与钢管的尺寸、材料的性能、焊接工艺参数等因素密切相关。

1.3 焊接工艺对残余应力的影响

焊接工艺直接决定了焊接过程中的热输入、冷却速率以及焊缝金属的组织结构，因此对残余应力的分布有着重要影响。适当选择焊接参数、优化焊接工艺、采用合理的焊接顺序和控制焊接热输入量等，都能有效减少残余应力的产生。采用多层多道焊接、间歇性焊接等方法可以降低热影响区的温度梯度，避免应力集中。控制焊接速度、焊接电流和电压等参数，有助于优化热输入，从而减小应力的产生。

作者简介：李文亮（1991--）；男；甘肃定西人；工程师；水电站压力钢管制作安装、闸门启闭机安装、机电设备安装及电站信息化数字化建设技术管理。

在一些特殊情况下,还可以采取焊后热处理和冷却过程的控制措施,减少焊缝区域的应力积累。通过合理的工艺调整,可以在一定程度上降低焊接过程中的残余应力,从而提高钢管的疲劳性能和使用寿命。

2 压力钢管焊缝残余应力的形成与分布

2.1 焊接过程中的热-力学行为

在焊接过程中,由于焊接热源的作用,金属的局部区域温度迅速升高,随之而来的是金属的热膨胀。然而,随着焊接过程的进行,焊接区域会迅速冷却,金属发生收缩。由于钢管的各个部分冷却速率不同,热-力学行为导致了不同区域产生不同的应力。尤其是在焊缝区域,由于金属熔化和重新凝固的过程,焊缝区域和热影响区的变形与母材相比存在较大差异,从而产生了残余应力。由于焊接工艺、材料特性和温度场的影响,焊接过程中会产生明显的温差,温度梯度的存在进一步加剧了残余应力的形成。

2.2 焊缝残余应力的影响因素

焊缝残余应力的形成受到多种因素的影响,主要包括焊接工艺参数、材料性能、焊接顺序以及温度场的分布等。焊接工艺参数如焊接电流、电压、焊接速度等直接决定了焊接热输入的大小,热输入过大或过小都可能导致焊接应力不均匀。焊接材料的类型、焊接时的材料温度、焊接后的冷却速度等因素也会影响残余应力的大小和分布。钢管的尺寸和厚度差异会使热膨胀和收缩程度不同,导致残余应力的形成。焊接的顺序也会影响温度场的变化,因此合理的焊接顺序可以有效避免过多的应力集中。

2.3 残余应力的测量方法与技术

测量焊缝残余应力是评估焊接质量及其对钢管性能影响的关键步骤。常用的残余应力测量方法包括应变片法、X射线衍射法、超声波法等。应变片法通过在钢管表面粘贴应变片,测量钢管在特定方向上的变形,进而计算出残余应力的大小和分布。这种方法精度较高,适用于小范围的应力测试。X射线衍射法则利用X射线照射金属表面,根据衍射图样推算出晶格畸变程度,进而测量残余应力。超声波法利用超声波在钢管内传播的速度与应力状态之间的关系,通过测量超声波的传播时间来推算残余应力。这些方法在实际应用中各有优缺点,需要根据实际情况选择合适的测量技术。

3 残余应力对疲劳裂纹萌生的影响机制

3.1 疲劳裂纹的产生与扩展过程

疲劳裂纹的产生通常始于材料长期承受周期性应力,特别是在受力集中的部位。钢管在经历长时间的负荷变化时,材料

内部的微小缺陷或不连续性会逐渐成为裂纹萌生的起点。这些裂纹最初为微小的裂缝,往往难以被发现,但随着应力持续作用,它们会逐步扩展。在高频率的荷载循环中,裂纹扩展的速度逐渐加快,特别是在应力集中的区域,裂纹可能迅速增大并扩展。疲劳裂纹的扩展速率与应力幅值、加载频率、环境因素以及材料的力学性能和组织结构密切相关。环境因素如湿度、温度等也会影响疲劳裂纹的扩展。在焊缝区域,残余应力尤为显著,因其引起局部拉伸应力,使得裂纹更加容易形成并扩展。随着裂纹扩展,钢管的抗疲劳性能会显著降低,最终可能导致破裂或失效。

3.2 焊缝残余应力对疲劳裂纹扩展的加速作用

焊缝残余应力对疲劳裂纹扩展起着加速作用,尤其是在焊接过程中形成的拉应力区域。这些残余应力不仅改变了材料的内应力分布,还为裂纹的产生和扩展提供了有利条件。焊接过程中的热膨胀和收缩导致了局部区域的应力集中,尤其是在焊缝区域,这些应力集中部位常常成为裂纹扩展的起点。特别是焊缝处的拉应力,可以在裂纹尖端产生较大的应力场,导致裂纹沿着应力集中的区域扩展,极大地加快了裂纹的扩展速度。疲劳载荷下,残余应力的作用使得裂纹的扩展速率明显高于没有残余应力影响的情况下。这种加速作用在高循环疲劳载荷下尤为突出,因为高频率的加载使裂纹不断扩展,进一步降低钢管的抗疲劳能力。在焊接过程中合理控制焊缝残余应力的大小和分布,对于延缓疲劳裂纹的扩展至关重要。

3.3 疲劳裂纹扩展速率的理论模型与实验研究

疲劳裂纹扩展速率的研究通常结合理论模型与实验数据进行。裂纹扩展速率与应力强度因子的幅值成正比,即随着应力强度因子的增加,裂纹扩展速度也会加快。实际工程中,由于焊接残余应力的存在,裂纹扩展过程会变得更加复杂。残余应力场不仅影响裂纹扩展的路径,还会改变裂纹的扩展速度,特别是在焊接接头和热影响区。焊接残余应力会在裂纹尖端形成应力集中区域,从而加速裂纹的扩展。为更准确地描述这一现象,研究人员提出了更为复杂的裂纹扩展模型,结合残余应力场对裂纹扩展的影响。实验研究表明,焊缝区域的残余应力显著影响疲劳裂纹的扩展速率,特别是在不同焊接工艺条件下。

4 优化焊接工艺减少残余应力的方法与效果

4.1 改进焊接工艺参数的选择

焊接工艺参数的优化是减少焊接过程中残余应力的关键因素之一。焊接电流、电压和焊接速度是影响焊接热输入和焊接质量的三个主要参数。适当降低焊接电流和电压可以有效地减少热输入,避免过多的热量进入焊缝区域,从而减少热膨胀

和收缩所引起的残余应力。特别是在厚壁压力钢管的焊接过程中,过高的电流和电压可能会导致过多的热输入,使焊接区域出现较大的温差,从而形成严重的残余应力。而合理的焊接速度则能够确保热影响区的温度梯度得到有效控制,从而减少热变形和应力集中。在保证焊缝质量和强度的基础上,通过对这些参数的精确调整,可以显著降低残余应力的形成,提高焊接质量并增强钢管的抗疲劳性能,使其更适应长期复杂工况的运行需求。

4.2 焊缝预热与后处理技术

焊缝预热和焊后热处理是减少焊接应力、提高钢管疲劳性能的重要技术手段。在焊接前进行预热处理,可以使金属材料的温度更均匀,降低焊接过程中产生的温差,从而减少因冷却速度不一致而产生的应力集中。预热有助于防止冷裂纹的发生,尤其是在高强度钢材的焊接中,其效果更加显著。在焊接完成后,焊后热处理可以进一步缓解残余应力。在热处理中,钢管会被加热至特定温度并保持一定时间,接着缓慢冷却,这一过程能够使焊缝和母材的应力逐步释放,减小温差,从而降低残余应力的累积。热处理还能够改善钢管的组织结构,提高其综合力学性能。综合运用焊前预热与焊后热处理,能够有效提升钢管的耐疲劳性能、抗裂纹扩展能力和使用寿命。

4.3 残余应力缓解方法的应用效果

除了焊前预热和焊后热处理外,残余应力缓解技术还包括机械加工和激光处理等方法。机械加工可以去除钢管表面的不规则缺陷,调整焊接过程产生的应力分布,减小应力集中,进而有效缓解残余应力。在实际操作中,机械加工可以通过表面打磨、磨削或车削等手段,去除焊接产生的残余应力集中区域,从而提高钢管的整体性能。激光处理技术通过局部加热和快速冷却钢管表面,可以有效调节钢管表层的应力状态。激光处理能够在不显著改变材料内部结构的情况下,消除表面区域的残余应力,从而改善钢管的抗疲劳性能和抗裂纹扩展能力。这些缓解方法在抽水蓄能电站压力钢管的制造和维修中得到了广泛应用,显著提高了钢管的安全性、可靠性及其长期稳定性,确保电站的持续高效运行。见表1:

表1 不同壁厚压力钢管焊接预热温度推荐值(国内工程常用参考)

序号	钢管壁厚(mm)	Q345	Q460	Q690
1	≤25	-	80~120℃	80~150℃
2	>25-30	-	80~120℃	80~150℃

3	>30-38	60~80℃	80~120℃	80~150℃
4	>38	80~120℃	80~150℃	80~150℃

5 提高抽水蓄能电站安全性的策略与建议

5.1 残余应力控制在钢管设计中的应用

在抽水蓄能电站压力钢管的设计阶段,残余应力的控制被视为提升钢管性能和延长使用寿命的关键因素之一。设计团队可以选择具有更高韧性和强度的材料,减少焊接过程中产生的应力集中。使用具有良好焊接性和低热膨胀系数的钢材可以显著减少焊接后的残余应力。优化焊接工艺同样至关重要,焊接顺序和焊接参数的合理选择不仅有助于减小热影响区的温差差异,还能有效控制焊接热输入,避免产生过大的应力集中。适当的焊后热处理能够有效消除焊接过程中产生的残余应力。通过这些手段,设计阶段便能有效减少焊缝处的应力,从而提升钢管的疲劳性能、抗腐蚀能力和使用寿命。

5.2 疲劳裂纹扩展速率监测与评估技术

为了确保抽水蓄能电站在长时间运行中的安全性,必须定期对压力钢管的疲劳裂纹扩展速率进行监测与评估。现代技术提供了多种监测手段,其中声发射技术通过探测钢管内部微裂纹的发生与扩展过程,能够实时提供裂纹扩展的动态信息。超声波检测技术则能高效、无损地检测钢管内部的疲劳裂纹,且具有较高的灵敏度。通过定期实施这些监测手段,能够在早期发现潜在的裂纹问题,避免严重裂纹导致的突发性失效。数据采集与分析系统可以实时监控钢管在不同工作条件下的疲劳表现,为电站的安全运行提供依据。这样,定期的疲劳裂纹评估不仅有助于提高电站的运行稳定性,也能有效延长设备的使用寿命。

5.3 未来研究方向与技术发展趋势

未来的研究将集中在提升抽水蓄能电站压力钢管的设计与制造技术上,特别是在焊接工艺和材料选择方面。随着高性能合金材料的出现,钢管的抗疲劳性和抗腐蚀性能有望进一步提高。研究人员还将在疲劳裂纹扩展评估模型的改进上投入更多精力,寻求更加精确、灵敏的预测方法,以便在早期阶段发现钢管潜在的疲劳问题。随着科技的发展,残余应力测量技术也不断进步。新型的无损检测技术和高精度的传感器系统有望在未来为钢管的疲劳性能提供更加准确的监控与评估手段。通过这些技术的持续创新,未来的抽水蓄能电站将更加安全、高效,运行寿命也将大大延长。

6 结语

本文通过对抽水蓄能电站压力钢管焊缝残余应力对疲劳裂纹扩展速率影响的研究,探讨了焊接工艺、残余应力的形成与分布以及其对疲劳裂纹扩展的加速作用。研究表明,焊接过程中产生的残余应力会显著影响裂纹的萌生与扩展,尤其在高

循环疲劳荷载下,裂纹扩展速度大幅提升。通过优化焊接工艺、控制焊接残余应力以及采用有效的应力缓解技术,可以有效延长压力钢管的使用寿命,提高抽水蓄能电站的安全性和稳定性。未来的研究可以进一步关注高性能材料的应用以及疲劳裂纹扩展的精准预测模型。

参考文献:

- [1] 刘峰,周建华.焊接残余应力对压力容器疲劳性能的影响研究[J].焊接技术,2018,39(4):23-27.
- [2] 李静,陈立民.焊接过程中残余应力的产生及其影响因素分析[J].材料科学与工程学报,2017,35(6):45-50.
- [3] 高伟,王晨.焊接残余应力对结构疲劳寿命的影响[J].结构安全与振动,2019,40(5):109-114.
- [4] 陈光,张阳.抽水蓄能电站压力钢管的疲劳裂纹扩展研究[J].电力工程技术,2020,42(7):66-71.
- [5] 赵俊,孙博文.焊接应力对钢管疲劳裂纹扩展速率的影响研究[J].机械工程学报,2016,52(2):102-108.