

# 高性能风电紧固件的热处理工艺解析

姜栋 宋斌 陈小雄 朱文博 赵建强

定西高强度紧固件股份有限公司，甘肃省定西市安定区，743000；

**摘要:** 本文详细探讨了高性能风电紧固件的热处理工艺，旨在解析其对紧固件性能的影响以及在制造过程中的应用。通过对退火工艺的深入分析，本文揭示了热处理工艺在提升风电紧固件强度、韧性和耐腐蚀性方面的重要性。同时，文章还讨论了热处理工艺质量控制的方法和挑战，并提出了相应的对策。最后，本文强调了热处理参数控制和过程监控在确保风电紧固件质量中的关键作用。

**关键词:** 高性能；风电紧固件；热处理工艺

**DOI:**10. 69979/3041-0673. 24. 5. 035

## 引言

在风电行业中，紧固件作为连接风电塔架、叶片和发电机等关键部件的重要组件，其性能直接影响整个风电系统的稳定性和可靠性。因此，对风电紧固件的性能要求极为严格，尤其是在恶劣的气候和复杂的载荷条件下。热处理工艺作为提升紧固件性能的关键步骤，其重要性不言而喻。本文将重点分析退火工艺对风电紧固件性能的影响，并探讨在实际制造过程中如何应用这些工艺以满足风电设备对紧固件的高标准要求。此外，本文还将深入探讨热处理工艺质量控制的策略，以及如何通过有效的过程监控和参数控制来确保风电紧固件的最终质量。

## 1 风能发展背景及重要性

随着全球能源危机的日益加剧和环境保护意识的提升，风能作为一种清洁、可再生的能源，其重要性在世界范围内得到了前所未有的关注。风能的发展经历了从早期的试验阶段到如今的规模化应用，已经成为全球能源结构转型的重要驱动力之一。据统计，截止 2020 年，全球风能装机容量已超过 700GW，预计到 2030 年，这一数字将超过 1800GW。这个惊人的增长速度不仅反映了风能技术的进步，也凸显了其在应对气候变化和能源需求增长方面的关键作用。

风能的开发与利用不仅有助于减少温室气体排放，从而对抗全球气候变化，而且能够缓解对化石燃料的依赖，促进能源安全。另外，风能产业的崛起还带来了显著的经济效益和社会效益。它创造了大量就业机会，尤其是在安装、维护和运营阶段，对地方经济的拉动作用显著。同时，风能产业的发展也推动了相关技术的进步，如材料科学、电力电子、智能电网和储能技术等，这反过来又为其他行业的创新提供了技术和经验支持。

在政策层面，许多国家通过制定鼓励可再生能源发展的法规和激励措施，如 feed-in-tariff (FIT) 制度、上网电价

补贴等，为风能产业的发展提供了有力的支撑。国际组织如 IEA（国际能源署）和 IRENA（国际可再生能源署）也在全球范围内推广风能的使用，并制定了雄心勃勃的风能发展目标。

然而，要实现风能的大规模应用，仍面临一些挑战，如风电设备的高成本、电网接入问题、环境影响以及风能的间歇性等。其中，风电紧固件作为风电设备的关键组成部分，其性能的提升对于整个风电产业链的优化至关重要。高性能风电紧固件的热处理工艺正是实现这一目标的关键技术之一。通过深入研究和优化热处理工艺，可以制造出强度高、耐疲劳、抗腐蚀的紧固件，确保风电设备在严苛环境下长期稳定运行，从而推动风能产业的持续发展。

## 2 高性能风电紧固件概述

### 2.1 高性能风电紧固件的定义及特点

高性能风电紧固件，顾名思义，是指在风电设备中所使用的，具备高强度、高耐疲劳性以及优异抗腐蚀性能的紧固件。这些紧固件主要用于连接和固定风电设备的关键部件，如叶片与主轴、塔筒与机舱等。它们承受着巨大的动态载荷，包括风载、振动和温度变化带来的应力，因此必须具备卓越的机械性能和耐环境侵蚀能力。

这些紧固件的特点主要体现在以下几方面：首先，高屈服强度和抗拉强度，以确保在极端风况下能牢固连接各部件，防止松动或失效。其次，高耐疲劳性能，能够抵御长期的循环载荷而不发生疲劳断裂，保证风电设备的长期稳定运行。再者，出色的抗腐蚀性能，能在盐雾、风蚀和温度极端变化的环境中保持良好的机械性能，防止由于材料劣化导致的失效。此外，高性能风电紧固件还要求良好的尺寸稳定性，以确保在热胀冷缩或长期使用后仍能保持紧固状态。

### 2.2 高性能风电紧固件的结构与材料

高性能风电紧固件的结构设计往往需要兼顾强度与韧性

的平衡。螺栓、螺母、垫圈等常见的紧固件结构，其螺纹部分需具备足够的强度以承受预紧力，而杆部则需要具有良好的韧性以抵抗动态载荷和振动。为了实现这些要求，通常采用特殊合金材料，如 42CrMo、20MnTiB、35CrMo 等，这些材料通过添加如铬、锰、钼等合金元素，显著提高了材料的硬度、强度和韧性。

制造过程中，材料的纯净度和微观组织结构对性能至关重要。高纯净度可以减少杂质对材料性能的不利影响，而优化的微观组织结构（如索氏体、马氏体或贝氏体）可以实现机械性能的最佳平衡。此外，表面处理如磷化、镀锌或渗碳，不仅增强了抗腐蚀能力，还改善了紧固件的摩擦系数和磨损性能。

## 2.3 高性能风电紧固件在风电设备中的功能与要求

在风电设备中，高性能紧固件承担着至关重要的角色。它们不仅是各部件的“骨骼”，确保结构的稳定，也是负荷传递的关键媒介。从基础的塔筒与机舱连接，到叶片的旋转驱动，再到发电机的固定，每个环节都离不开紧固件的稳固支撑。

风电设备通常在户外恶劣环境中运行，包括高盐分、高湿度以及极端温度变化，这要求紧固件必须具备出色的耐腐蚀性和耐候性。此外，由于风力发电的动态特性，紧固件还要能承受持续的振动和疲劳载荷，确保在数十年的运行期内，无论是在起始安装阶段的预紧，还是在运行过程中的动态负载，都能保持可靠的连接性能。

为了满足这些要求，风电紧固件的选型和安装需遵循严格的标准和规范，如 DIN、ANSI、ISO 等。在设计阶段，必须进行详细的应力分析和寿命评估，确保紧固件在各种工况下的安全可靠。同时，制造过程中的热处理工艺，如退火、正火、淬火和回火，对紧固件的性能有决定性影响，因此，精确控制热处理参数，如加热温度、冷却速度和回火温度，是制造高性能风电紧固件的核心技术。

## 3 高性能风电紧固件热处理工艺解析

### 3.1 退火工艺

在风电紧固件的生产制造过程中，退火工艺扮演着至关重要的角色，是整个制造流程中的第一个关键环节。具体来说，

退火工艺的基本原理涉及将紧固件加热至特定的温度，并在该温度下保持一段时间。随后，通过一个缓慢冷却的过程，使紧固件逐渐降温。这一系列操作的主要目的是为了消除或显著减少金属内部存在的残余应力。通过这种方式，可以有效地均匀化金属的化学成分，同时细化晶粒结构，从而

达到优化材料性能的效果。

经过退火处理后，紧固件的硬度会有所降低，而塑性和韧性则得到显著提升。这样的材料特性变化为紧固件后续的热处理步骤奠定了坚实的基础。退火工艺不仅有助于改善材料的机械性能，还能提高其加工性能，使其在后续的加工过程中更加易于成形和加工，从而确保最终产品的质量和性能满足风电行业的严格要求。

### 3.2 退火工艺对风电紧固件性能的影响

退火处理对风电紧固件的性能有着显著的影响。首先，通过降低材料硬度，使得加工更容易进行，同时也能避免在后续工艺中因过度硬化导致的脆性。其次，消除内部残余应力，可以提高紧固件在长期使用中的稳定性，减少因应力集中导致的疲劳裂纹。此外，细化晶粒结构能提升材料的均匀性，降低各部分性能的不一致性，从而提高整体的机械性能。

### 3.3 退火工艺在风电紧固件制造中的应用

在实际应用中，退火工艺通常在锻造或铸造后的毛坯阶段进行。对于风电紧固件的特殊合金材料，如 42CrMo 钢，退火的温度通常设定在 700-850℃，保持一段时间后，通过炉冷或空冷的方式使其缓慢冷却。通过精确控制退火温度和冷却速度，可以确保材料在保持足够强度的同时，也具备良好的塑性和韧性，为后续的热处理如正火、淬火和回火创造有利条件。

正火工艺。正火工艺是紧固件热处理过程中的关键一环，正火的基本原理是在固溶处理后将工件加热至略高于临界点的温度，随后以适当速度冷却。这一过程通常是为了获得均匀的索氏体组织，以提高材料的综合力学性能，及增强材料的耐磨性和硬度。

正火工艺对风电紧固件性能的影响。正火处理能够改善风电紧固件的性能，提高其屈服强度和抗拉强度，同时保持一定的韧性。通过获得均匀的索氏体组织，材料的抗疲劳性能得到显著提升，有助于抵抗在风力发电设备运行过程中产生的反复负载。此外，正火还能细化晶粒，提高材料的抗腐蚀性，延长紧固件的使用寿命。

正火工艺在风电紧固件制造中的应用。在风电紧固件制造中，正火常常用于退火后的强化处理。例如，在 42CrMo 钢高强螺栓的制造中，正火温度通常设定在 850-900℃，冷却方式通常选择水冷或油冷，以确保快速获得索氏体组织。通过优化正火工艺的参数，可以有效提高风电紧固件的综合性能，满足其在严苛环境下的使用需求。

## 4 高性能风电紧固件热处理工艺质量控制

### 4.1 热处理工艺质量控制方法

为了确保风电紧固件的热处理工艺质量,必须实施严格的质量控制措施。首先,对热处理设备进行定期的校准和维护,确保温度控制的精确性。其次,采用先进的温度监测系统,实时监控热处理过程中的温度变化,确保加热和冷却过程符合预定的工艺参数。此外,对热处理后的紧固件进行抽样检测,包括硬度测试、金相分析和拉伸测试等,以评估热处理效果是否达到设计要求。

#### 4.2 热处理工艺质量控制的重要性

热处理工艺质量控制对于保证风电紧固件的性能至关重要。不恰当的热处理可能导致材料性能下降,甚至出现裂纹、变形等缺陷,严重影响紧固件的使用寿命和风电设备的安全性。因此,通过有效的质量控制,可以避免这些问题的发生,确保风电紧固件在极端环境下的可靠性和耐久性。

#### 4.3 热处理工艺质量控制的挑战与对策

在热处理工艺质量控制过程中,面临的挑战包括温度控制的精确性、材料反应的可预测性以及热处理后性能的稳定性。为了应对这些挑战,需要采用先进的热处理技术和设备,同时结合材料科学和工程知识,对热处理工艺进行优化。此外,建立完善的质量管理体系,对热处理过程中的每一个环节进行严格监控和记录,是确保风电紧固件质量的关键。通过这些措施,可以有效提升风电紧固件的热处理工艺质量,为风能产业的可持续发展提供坚实的技术支持。

#### 4.4 热处理工艺参数控制

在热处理工艺参数控制方面,精确控制加热温度、冷却速度和回火温度是至关重要的。例如,对于 42CrMo 钢材料的风电紧固件,淬火温度的控制必须精确到 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内,以确保材料获得最佳的硬度和强度。同时,回火温度的控制也需精确,以避免材料过度硬化或软化,保持材料的韧性与强度平衡。此外,冷却速度的控制同样重要,过快的冷却速度可能导致材料内部产生裂纹,而过慢的冷却速度则可能无法达到预期的硬度和强度。因此,采用计算机控制的热处理炉和精确的温度控制设备,可以有效提高热处理工艺的精确度和重复性,从而确保风电紧固件的性能一致性。

#### 4.5 热处理过程监控

为了实现对热处理过程的实时监控,现代风电紧固件制

造中广泛采用计算机控制系统。这些系统能够精确记录和控制热处理炉内的温度变化,确保按照既定的工艺曲线进行加热和冷却。通过实时数据采集和分析,可以及时发现并调整任何偏离标准的参数,从而保证热处理质量。此外,监控系统还可以记录热处理过程中的关键数据,为后续的质量追溯和分析提供重要依据。在实际操作中,监控系统与热处理炉的自动化设备相结合,可以实现从装炉到出炉的全过程自动化控制,大大提高了生产效率和产品的一致性。

#### 5 结语

在风电紧固件的热处理工艺中,退火和正火工艺的合理应用,不仅能够提升材料的机械性能,还能确保紧固件在长期运行中的稳定性和可靠性。随着风电技术的不断进步,对紧固件的性能要求也越来越高。因此,热处理工艺的质量控制显得尤为重要。通过精确的温度控制、冷却速度和回火温度的管理,以及实时监控系统的应用,可以确保风电紧固件在极端环境下的性能一致性,满足风能产业对高性能紧固件的需求。未来,随着材料科学和热处理技术的进一步发展,风电紧固件的热处理工艺将更加精细和高效,为风能的可持续发展提供更加坚实的技术支持。

#### 参考文献

- [1] 包石磊. 风电用高强度紧固件用钢成分设计及热处理工艺研究[J].《天津冶金》,2021 年第 3 期 30-32,37,共 4 页
- [2] 严琴. 42CrMoA 六角螺栓的热处理工艺模拟[J].《湖南有色金属》,2023 年第 3 期 65-68,82,共 5 页
- [3] 庄攀. 浅析风电叶片高强度螺栓的选材与热处理工艺[J].《热加工工艺》,2019 年第 12 期 175-177,共 3 页
- [4] 陈颖. 10.9 级风电紧固件用钢的开发[J].《中国金属通报》,2020 年第 22 期 151-152,共 2 页
- [5] 刘风雷. 航空 Incone1718 高强紧固件螺纹温滚压成形技术[J].《航空制造技术》,2014 年第 3 期 71-73,共 3 页
- [6] 李诗斌. 高强度风电螺栓用钢的材料选择与性能研究[J].《中国金属通报》,2022 年第 4 期 137-139,共 3 页.