

Q420 板材在风力发电设备中的焊接技术及质量控制研究

代磊落

广东粤水电装备集团有限公司, 广东 广州 510000

[摘要]随着全球对可再生能源需求的不断增长, 风力发电在能源结构调整与碳减排进程中的作用日益凸显。作为风电机组的核心承重结构, 塔筒的稳固性与耐久性直接影响风电场的长期运行安全。近年来, 风电机组朝着大功率、高塔架方向发展, 对塔筒材料的强度及性能要求日趋严格。Q420 板材凭借出色的力学特性与较高的屈服强度, 已逐步替代 Q355 钢材, 成为风电塔筒制造中的主要选材, 并在行业内得到广泛应用。文章基于风电设备制造的工程实践, 围绕 Q420 板材的焊接方式、材料匹配、工艺控制及检测技术展开深入研究, 研究成果可为行业提供技术参考, 并为风电塔筒焊接质量的提升奠定理论基础。

[关键词] Q420 板材; 风力发电设备; 焊接技术

DOI: 10.33142/hst.v8i3.15828

中图分类号: TG47

文献标识码: A

Research on Welding Technology and Quality Control of Q420 Plate in Wind Power Equipment

DAI Leiluo

Guangdong Yueshuidian Equipment Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, China

Abstract: With the continuous growth of global demand for renewable energy, the role of wind power generation in energy structure adjustment and carbon reduction process is becoming increasingly prominent. As the core load-bearing structure of wind turbines, the stability and durability of the tower directly affect the long-term operational safety of the wind farm. In recent years, wind turbines have been developing towards high power and high tower structures, with increasingly strict requirements for the strength and performance of tower materials. Q420 sheet metal has gradually replaced Q355 steel due to its excellent mechanical properties and high yield strength, becoming the main material for wind turbine tower manufacturing and widely used in the industry. Based on the engineering practice of wind power equipment manufacturing, this article conducts in-depth research on the welding method, material matching, process control, and testing technology of Q420 sheet metal. The research results can provide technical references for the industry and lay a theoretical foundation for improving the welding quality of wind power tower tubes.

Keywords: Q420 board; wind power generation equipment; welding technology

引言

风力发电塔筒作为风电机组的重要组成部分, 在运行期间需承受风荷载、设备偏载、运行振动及突发阵风等多重作用。近年来, 风电平价上网政策的推行以及“碳达峰、碳中和”目标的推进, 促使风电机组向大容量、高塔架方向发展, 对塔筒材料的性能要求不断提高。Q355 钢材的强度与稳定性已难以满足新型风电设备的技术标准, 而 Q420 高强钢因具备更高的屈服强度和优良的力学性能, 逐渐成为塔筒制造的优选材料。尽管在承载能力和结构稳定性方面具备显著优势, 该材料在焊接过程中易出现冷裂纹、未熔合及热影响区脆化等质量问题, 焊接难度较大。为保证塔筒的结构安全及焊接质量, 工艺优化、精准控制焊接参数以及质量检测手段的完善已成为关键环节。

1 焊接技术

在风力发电塔筒的制造过程中, 焊接工艺的质量直接影响塔筒的承载能力、使用寿命以及整体安全性能。随着风电技术的快速发展, 风力机组功率不断增大, 塔筒的直径和高度也随之增加, 对结构强度和制造精度的要求愈发严格。为了满足更高强度、更大承载能力的需求, Q420 板材因其优越的力学性能, 被广泛应用于风电塔筒的制造,

并逐步取代传统的 Q355 钢材。然而, 与 Q355 钢相比, Q420 钢板对焊接工艺的要求更高, 焊接时易产生冷裂纹, 导致对焊接参数控制、预热处理以及焊后热处理提出了更严格的要求^[1]。若缺乏科学合理的焊接方法以及精细化的工艺控制, 焊缝质量难以达到设计标准, 结构的稳定性和长期服役能力也将受到影响。因此, 研究适用于 Q420 板材的焊接技术, 优化焊接工艺参数, 并提升自动化焊接水平, 是保证风力发电塔筒制造质量的关键。本文围绕焊接方法、焊接材料以及工艺控制展开深入探讨, 以期对风力发电塔筒制造提供理论依据, 并为焊接技术优化提供实践指导。

1.1 焊接方法

1.1.1 埋弧自动焊 (SAW)

埋弧自动焊 (SAW) 因其高效、稳定、焊接质量均匀的特点, 在风电塔筒的制造过程中得到了广泛应用, 主要用于纵缝及环缝的焊接。该工艺通过采用 $\phi 4\text{mm}$ 焊丝, 并配合氟碱型烧结焊剂, 在高温输入条件下形成深熔焊缝, 使焊缝具备优异的力学性能。焊接过程中的电流、电压及焊接速度可通过设备的精准调节保持稳定, 确保熔合均匀、焊缝成分一致, 同时使焊缝表面光滑, 提高整体焊接质量的可控性^[2]。由于埋弧自动焊的自动化程度较高, 操作过

程中对焊工技能的要求相对较低,在风电塔筒大规模生产中得到广泛采用。此外,该工艺在降低焊接缺陷概率、改善焊缝抗疲劳能力方面表现突出,使塔筒在长期服役期间的结构安全性进一步增强。

1.1.2 熔化极气体保护焊(GMAW)

对于角焊缝及空间受限的塔筒结构部位,埋弧焊难以施焊,此时通常采用熔化极气体保护焊(GMAW)进行焊接。该工艺通过二氧化碳气体保护熔化极焊丝,形成稳定的电弧,在较高热输入条件下实现快速焊缝成型,同时具备优异的操作灵活性,并适用于各种焊接位置。根据焊丝类型不同,可分为实心焊丝和药芯焊丝两类。前者焊接效率较高,而后者在焊缝冶金组织均匀性及力学性能稳定性方面表现更为突出,但对存储环境的湿度控制要求较高,避免受潮影响焊接质量。通过优化焊接参数以及选择合适的焊丝材料,GMAW能够有效提高焊缝的抗冲击和抗疲劳性能,确保风电塔筒关键部位的连接安全性。

1.2 焊接材料

焊接材料的选择和管理在焊接工艺的稳定性及焊缝质量控制中占据重要位置,对焊接接头的冶金结合及力学性能起着决定性作用。Q420 板材属于低合金高强度钢,依据 GB/T 1591—2018 标准,其交货状态分为 N 板与 M 板。在风电塔筒制造领域,Q420NE 与 Q420ME 两种型号应用较广,二者在化学成分及力学性能上存在一定差异,但均可满足高强度结构的技术要求。母材中碳、硅、锰等主要合金元素的含量需要严格控制,以确保焊接接头与母材之间形成稳定的冶金结合。针对不同的焊接方式,所选焊材类型有所不同^[3]。埋弧焊通常选用 S55A4x 型 $\phi 4\text{mm}$ 焊丝,并搭配氟碱型焊剂,而二保焊则需采用 G55A4x 型实心焊丝或 T55A4x 型药芯焊丝,其化学及力学性能必须符合国家标准。焊剂在使用前必须经过 $350\sim 400^{\circ}\text{C}$ 的充分烘干,以防止受潮影响焊接质量,确保焊接材料在施焊过程中的稳定性。

1.3 坡口处理

坡口处理是焊接前的重要准备工序,对焊缝成形、冶金组织以及整体连接强度有直接影响。在 Q420 板材的焊接中,必须根据工艺要求精确开设坡口。埋弧焊一般使用单边 V 型坡口,控制角度为 $25\pm 5^{\circ}$,钝边宽度为 $5\sim 7\text{mm}$;二保焊则推荐坡口角度为 $20\pm 5^{\circ}$,钝边宽度通常为 $3\sim 4\text{mm}$ 。坡口加工完成后,必须彻底清理坡口内外至少 25 至 30mm 范围内的表面,去除油污、铁锈、氧化皮等可能影响焊接的杂质,确保坡口尺寸和表面状况符合设计要求。此过程对机械加工设备提出了较高的要求,同时对操作人员的技术水平和现场检测能力也有严格要求。只有当坡口处理达到预定标准后,才能进行后续焊接作业,为焊接接头的冶金质量与长期稳定性打下坚实的基础。

1.3.1 工艺控制与预热措施

Q420 板材具有较高的冷裂纹敏感性,尤其在碳当量超过 0.38 时,焊接过程中容易产生裂纹。工艺控制与预热措施对防止这一现象至关重要。焊接前,焊缝区域需进行充分预热。预热区域以焊缝中心为基准,向两侧延伸至

少为板厚的三倍,且不少于 25mm。预热温度通常控制在 $80\sim 120^{\circ}\text{C}$ 之间,随着板材厚度的增加,预热温度应适当提高。预热可采用电加热或火焰加热,火焰加热因加热速度较快且适应性强,广泛应用于塔筒制造过程中。红外测温仪被用来实时监控温度,确保温度分布均匀稳定。通过适当的预热,不仅可以防止氢致裂纹的产生,还能有效减缓热影响区晶粒粗化,从而改善焊接接头的韧性和延展性,为焊接后续力学性能的稳定提供保障。

1.3.2 焊接参数与层间温度控制

焊接参数与层间温度控制是确保焊接质量与焊缝冶金性能的核心。电流、电压以及焊接速度等参数必须控制在工艺评定的范围内,保证充分的热输入以实现良好的熔深,并避免过量热输入引起热影响区晶粒粗化。在埋弧焊中,通常采用多层多道焊接方式,而二保焊则多选择摆动焊接。在每一层焊接完成后,必须检测层间温度,确保其不低于预热温度且不超过 230°C ,以防止未熔合或裂纹等缺陷的产生。如层间温度偏低,需及时补充预热;若温度过高,则应通过自然冷却或其他有效降温手段进行调整。通过对焊接参数与层间温度的精确控制,可以有效改善焊接区域的冶金组织,降低残余应力及脆性缺陷的风险,从而为塔筒在服役过程中的稳定性提供保障。

1.3.3 后热处理

焊接后的后热处理对焊缝性能的提升及结构使用寿命的延长起着关键作用。其主要功能是消除焊接过程中产生的残余应力,促进氢的逸出,并优化焊接区域的微观组织。通常,后热处理温度应控制在 $250\sim 300^{\circ}\text{C}$ 之间,保温时间不少于 30 分钟。在这一过程中,残余氢能够迅速逸出,从而有效防止氢致裂纹的形成。与此同时,后热处理还可以缓解因焊接导致的局部应力集中,促进晶粒细化,降低脆性相的含量,提高焊缝的韧性与抗冲击能力。实施过程中,必须严格控制温度与保温时间,确保整个焊接区域温度分布均匀,并在自然冷却阶段保持稳定的降温速率,从而实现最佳的热处理效果,为塔筒在复杂工况下的长期稳定性提供保障。

1.3.4 环境因素

焊接环境因素在 Q420 板材的焊接中扮演着重要角色,尤其是在露天施工中,环境条件对焊接过程的影响尤为显著。风速大于 2m/s 时,气体保护焊容易受到风力影响,导致保护气体流失,进而影响电弧的稳定性。对于埋弧焊,风速应控制在 10m/s 以内,以防温度波动及飞溅现象的加剧。雨雪天气、低温以及高湿度条件也会对焊接金属的冶金反应及电弧特性造成不良影响。因此,必须采取必要的防护措施,如设置防风设施、调节作业环境的温湿度以及合理安排作业时段,确保焊接过程中的温度控制符合工艺要求。只有有效克服不利环境因素,电弧才能保持稳定,焊缝成形质量才能得到保证,从而为塔筒提供可靠的结构安全保障。

2 质量控制措施

2.1 人员资质

焊接工艺中的人员资质管理是确保焊接质量及施工安全的关键环节,直接影响焊接接头的冶金性能及其长期

稳定性。焊接作业属于特种作业,对操作人员的技术要求较高,因此,所有参与焊接的工作人员必须持有符合 GB/T15169 标准的合格焊工证,并通过严格的理论考试及实践操作考核。仅在通过焊接试板的验证后,方可正式上岗作业。此举有效避免了操作不当引发的焊接缺陷,同时确保了焊接过程中,如参数设定、预热控制、层温管理等关键工序能够严格遵循工艺要求。焊接质量的无损检测是确保焊接合格的重要保障,检测人员必须持有由中国特种设备检验协会或其他权威机构颁发的 A 级或 B 级资质,且需依据 GB/T9445 标准进行考核与评定。只有经过专业培训并且合格的人员,才能在检测中准确识别焊缝可能存在的裂纹、未熔合等缺陷,并对检测结果进行科学分析。严格的人员资质管理不仅提升了焊接技术水平,也为后续工艺稳定性及塔筒结构的长期安全运行提供了坚实的支持,显著降低了因人为操作不当所引发的质量隐患。

2.2 设备与焊材保障

焊接设备与焊材的质量直接关系到焊接接头的冶金质量与力学性能,其重要性不言而喻。焊接设备作为能量输入与参数控制的核心,其稳定性对焊接过程的连续性和一致性起着至关重要的作用。因此,所有焊接设备,包括电源、送丝装置、焊接机器人及监控仪器等,必须定期进行检修、维护与校准,以确保其长期稳定工作,避免设备故障或参数波动影响焊接质量。在此过程中,焊材的管理同样不容忽视。所有焊材在入厂后,须进行外观检查、化学成分分析以及力学性能测试,确保其性能符合相关国家与工程标准。特别是 Q420 板材焊接所用的埋弧焊丝及二保焊丝,其化学成分及力学性能应严格符合设计要求,以确保母材与焊缝之间的冶金结合良好。焊材的储存与使用过程中,必须严格控制环境条件,如焊剂需高温烘干处理,焊丝保持恒温状态,防止受潮后造成焊接缺陷。为确保材料的可追溯性,必须建立详细的焊材使用记录,涵盖检测结果、烘干次数以及使用情况等,这对于出现质量问题时能够快速追溯来源并及时处理具有重要意义。

2.3 工艺与环境控制

要实现高质量的焊接,严格执行焊接工艺及对环境精确控制是至关重要的,尤其是在风力发电塔筒的制造中尤为突出。每一个焊接工序都必须按照焊接工艺评定(WPS)执行,涉及坡口处理、预热、层温控制、焊后清根及后热处理等多个关键环节。在坡口处理阶段,应确保接边缘的精确加工,且应彻底清除油污、锈蚀及氧化皮等杂质,以保障焊缝的均匀融合。预热过程的设置需要根据板材厚度合理调整预热区域及温度(通常保持在 80~120℃之间),通过有效的预热控制,避免由于温度剧烈变化而引发热裂问题^[4]。在焊接过程中,电流、电压及焊速等焊接参数应始终保持在设定范围内,以确保焊接热输入均衡,避免因热输入过低或过高而导致晶粒粗化或焊接缺陷。同时,车间环境中的温湿度与气流状态也需进行严格监控,特别在露天施工或天气变化剧烈时,必须采取防风、防雨措施,确保保

护气体浓度稳定,避免电弧干扰。通过全面控制工艺环节及环境因素,不仅可有效减少焊接过程中因热输入不当导致的质量问题,还能确保焊接区域内的冶金组织均匀,残余应力合理分布,从而为塔筒结构的长期稳定性提供保证。

2.4 焊接质量检测

焊接质量检测在整个焊接工艺中占据了至关重要的地位,它能够帮助及时发现并处理焊缝中的潜在缺陷,确保焊接接头的最终质量。在 Q420 板材的焊接过程中,延迟裂纹的发生较为常见,因此,必须在焊接后的 24 至 48 小时内进行初步无损检测,待热影响区冷却后,再进行 48 至 72 小时内的全面检测。检测手段包括外观检查、超声波探伤、磁粉检测及射线检测等多种方法的结合,依据 NB/T47013 系列标准,对焊缝进行细致检查,确保不存在裂纹、气孔、未熔合等缺陷。发现缺陷部位后,应及时采取返修措施,通常采用二保焊进行修复,但同一位置的返修次数不应超过两次,超过两次时,必须得到技术负责人与监理工程师的共同批准。返修后的焊缝仍需重新检测,确保所有缺陷已被修复。全过程的检测数据、返修记录及设备校准情况需详细记录并归档,以便后期追溯与质量分析。通过严格的质量检测与记录体系,能够及时消除焊接过程中的各类潜在风险,为工程质量持续改进提供数据支持,从而确保风力发电塔筒具备优良的耐久性与安全性,为项目的顺利实施与安全运行奠定坚实基础。

3 结论

Q420 板材在风力发电塔筒焊接中的应用,虽然显著提高了结构性能及安全性,但其焊接过程仍面临较大的技术难度和质量控制挑战。通过合理选择焊接方法(如埋弧自动焊与熔化极气体保护焊的结合),以及恰当配对接头,能够有效降低延迟裂纹的发生风险。此外,严格控制坡口处理、预热、层温与后热等关键工艺,对保证焊接质量起到了关键作用。人员资质、设备保障及环境控制等方面的完善措施,确保了焊接过程的稳定性与质量。尽管当前焊接参数控制较为保守,但在保障安全的前提下,通过对更大电流、电压输入及焊速的研究,焊接生产效率有望得到进一步提升,为焊接技术的持续进步提供动力。

【参考文献】

- [1] 范静. 关于 AP1000 反应堆压力容器焊接技术质量控制的探讨[J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(11): 281-283.
 - [2] 王见君, 王繁. 大型回转窑筒体焊接技术及质量控制措施研究[J]. 现代交通与冶金材料, 2023, 3(1): 105-107.
 - [3] 柏琳. 采气工程双金属复合管焊接技术及质量控制[J]. 石油和化工设备, 2023, 26(8): 54-56.
 - [4] 丁斌, 林治鹏, 林稳. 压力管道工程焊接技术与质量控制研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(6): 109-111.
- 作者简介: 代磊落(1995.3—), 毕业院校: 安徽工业大学, 所学专业: 测控技术与仪器, 当前就职单位名称: 广东粤水电装备集团有限公司, 就职单位职务: 技术员, 职称级别: 助理工程师(水力机械)。