

钢结构焊接工艺优化对结构性能的影响

王清, 李维宇, 代连水, 张涛, 董慧欣
中建六局华北建设有限公司, 北京 100071

摘要： 本文的研究主要聚焦于钢结构焊接工艺优化这一关键主题，深入地探讨了其对钢结构各项性能的影响。首先文章阐述了钢结构焊接工艺的基础理论。接着再分别从强度、韧性、疲劳性能等方面详细分析了焊接工艺优化所产生的影响，当中包括工艺参数优化、焊接顺序与方法调整以及各类相关因素的控制对各性能指标的作用机制。此外还探讨了焊接工艺优化与钢结构抗震、防火等其他性能的关联，希望能够全面地揭示焊接工艺优化在提升钢结构性能方面的重要性，进而为钢结构焊接实践及相关工程应用提供有价值的参考依据。

关键词： 钢结构；焊接工艺优化；结构性能；强度

Effect of Optimization of Steel Structure Welding Process on Structural Performance

Wang Qing, Li WeiYu, Dai Lianshui, Zhang Tao, Dong Huixin
North China Construction Co., Ltd., China Construction Sixth Bureau, Beijing 100071

Abstract： The research in this paper mainly focuses on the key topic of steel structure welding process optimization, and deeply discusses its influence on various properties of steel structure. Firstly, the basic theory of steel structure welding process. Then, the influence of welding process optimization is analyzed in detail from the aspects of strength, toughness and fatigue performance, including the optimization of process parameters, the adjustment of welding sequence and method, and the action mechanism of the control of various related factors on each performance index. In addition, the correlation between the welding process optimization of steel structure and other properties is discussed, hoping to comprehensively reveal the importance of welding process optimization in improving the performance of steel structure, so as to provide valuable reference for the welding practice of steel structure welding and related engineering applications.

Keywords： steel structure; welding process optimization; structural performance; strength

引言

在现代建筑和工业领域的蓬勃发展进程当中，钢结构凭借其强度高、自重轻、施工速度快等诸多优势，在各类工程项目中得到了广泛应用。而焊接作为钢结构连接的关键工艺，其质量的好坏直接决定了钢结构整体的性能和安全性。在实际工程中，相关人员通过对焊接工艺进行优化，能够有效提升钢结构的强度、韧性、疲劳寿命等重要性能指标，从而进一步地保障钢结构在不同工况下的可靠服役。因此深入研究钢结构焊接工艺优化，对于结构性能的影响具有重要的现实意义，此举不仅有助于提高钢结构工程的质量，还能推动相关行业的可持续发展^[1]。

一、钢结构焊接工艺基础理论

（一）钢结构焊接原理与过程

钢结构焊接是利用电能或其他能源产生的热量，使得焊条或焊丝与母材金属局部熔化，从而形成熔池，随后熔池冷却凝固即可使焊件连接。从微观角度来看，母材金属的原子在焊接电弧的高温作用下，能够获得足够的能量，进而挣脱晶格束缚，始终处于活跃状态。接着其会与焊条或焊丝熔化后提供的填充金属原子相互扩散、融合，并且在冷却过程中按照一定的结晶规律重新排

列，最终形成焊缝金属。即整个焊接过程涉及到起弧、熔池形成、金属熔合、熔池凝固以及焊缝成型等多个阶段，并且每个阶段都相互关联，均对最终的焊接质量有着重要影响。

（二）焊接工艺参数及其相互关系

焊接工艺参数是影响钢结构焊接质量和性能的关键因素，其主要包括焊接电流、焊接电压、焊接速度、焊接热输入等。展开来说，焊接电流决定了单位时间内通过焊件的电荷量，它直接影响着焊缝的熔深，通常电流越大熔深就会越深，但过大的电流也可能导致焊件过热，从而引起焊缝金属晶粒粗大，影响其力学性

作者简介：王清（1991.02-），男，汉族，天津市，工程师，本科，研究方向：土木工程。

能。而焊接电压与电弧长度密切相关，当电压过高时会会使电弧过长，导致焊接过程不稳定，易产生飞溅。若电压过低则可能造成电弧熄灭，从而无法正常施焊。

焊接速度反映了焊接过程中焊条或焊丝沿焊接方向移动的快慢程度，即它与焊接电流、电压共同决定了焊接热输入。另外焊接热输入是指单位长度焊缝所吸收的热量，其计算公式为：热输入 = 焊接电流 × 焊接电压 / 焊接速度。相关人员合理控制焊接热输入，对于保证焊缝质量至关重要。因为过高的热输入会使焊缝及热影响区组织过热，降低其强度和韧性，而过低的热输入则可能导致焊缝熔合不良、未焊透等缺陷。

（三）焊接材料的选择与作用

1. 焊条由药皮和焊芯组成，其中焊芯作为填充金属成分与母材相近，主要作用是在焊接过程中熔化后填充焊缝。药皮则具有稳弧、造气、造渣等多种功能，因此它能够保护熔池免受空气中氧气、氮气等有害气体的侵入，同时改善焊缝金属的化学成分和性能。

2. 对于焊丝的选择同样关键，针对于不同的钢结构材质，如碳钢、合金钢等，相关人员需要选用与之匹配的焊丝，以此保证焊缝金属与母材在化学成分、力学性能等方面具有良好的相容性^[2]。

3. 焊剂常用于埋弧焊等焊接方法中，将它覆盖在焊接熔池表面，能起到隔离空气、保护熔池的作用。并且其还能够参与熔池的冶金反应，细化焊缝晶粒，以提高焊缝的质量和性能。

二、焊接工艺优化对钢结构强度性能的影响

（一）焊接工艺参数优化与强度提升

通常在焊接厚板钢结构时，相关人员应适当增加焊接电流，同时合理降低焊接速度，以此保证足够的热输入，进而确保焊缝根部完全熔透，使焊缝金属填充更加饱满，具有有效地传递应力，最终提升结构在承受拉力、压力等载荷时的强度表现。此外对于不同材质的钢结构来说，如低合金高强度钢，相关人员应根据其化学成分和力学性能特点，针对性地优化焊接电压等参数，如此才能使焊缝金属的微观组织更加致密均匀、晶粒细化。

（二）焊接顺序与方法优化对强度的影响

由于在复杂的钢结构焊接中，不同的焊接顺序会导致焊件产生不同的残余应力分布和变形情况。因此焊接顺序的合理安排对钢结构强度有着不容忽视的影响。例如对于大型框架结构的焊接，如果相关人员采用无序的焊接顺序，就可能会使结构局部产生过大的残余应力。此时在后续使用过程中，这些残余应力会与外加载荷叠加，极易容易引发应力集中，致使结构的强度承载能力降低，甚至导致结构过早失效。而相关人员经过优化焊接顺序，如采用对称焊接、分段退焊等方法，则可以有效控制焊接变形和残余应力的产生^[3]。

与此同时焊接方法的选择和优化也同样重要，其中不同的焊接方法具有不同的特点和适用范围。例如气体保护焊相较于传统的手工电弧焊，其更能够提供更稳定的电弧和更好的焊缝保护

效果，从而减少焊缝中的气孔、夹渣等缺陷，使得焊缝金属的质量更高，并且强度性能也更优。

（三）焊接缺陷对结构强度的影响及控制

焊接缺陷是影响钢结构强度的重要因素之一，一般常见的焊接缺陷包括气孔、夹渣、裂纹等。就气孔来说，去的存在会减小焊缝的有效截面积，使得焊缝在承受载荷时应力集中现象加剧，进而降低焊缝的承载能力，严重时此问题还可能会导致焊缝在较低的载荷下就发生破坏。

为了控制焊接缺陷对结构强度的影响，相关人员在焊接工艺优化过程中需要从多个方面采取措施。第一要严格控制焊接材料的质量，以此确保焊条、焊丝等无受潮、油污等杂质；第二是要优化焊接工艺参数，从而保证焊接过程的稳定性，并避免因参数不当产生气孔、夹渣等缺陷；第三则是加强焊接前的焊件清理工作，确保去除母材表面的铁锈、油污等杂质，以防止其混入焊缝；第四为采用合适的焊接后检验方法，如无损检测技术（超声检测、射线检测等），如此可及时地发现并处理焊接缺陷，从而保障钢结构的强度性能^[4]。

三、焊接工艺优化对钢结构韧性性能的影响

（一）焊接热循环对钢结构韧性的影响机制

实际在焊接热循环作用下，焊缝及其周围的母材会经历快速加热、高温停留以及随后的快速冷却过程，而这会使得材料的微观组织发生显著变化，进而影响其韧性性能。具体来说，当焊缝金属快速加热到高温时，其原有的晶粒会长大，但在冷却过程中，如果冷却速度过快，就可能会形成粗大的马氏体组织，而马氏体组织硬度高、脆性大，因此其会严重降低焊缝的韧性。相反而言，如果冷却速度过慢，则可能出现贝氏体、珠光体等组织，虽然此时韧性相对马氏体有所提高，但可能达不到理想的韧性要求。

因为不同的焊接工艺参数会导致不同的热循环曲线，从而影响焊缝及热影响区的组织转变和韧性表现。对于深入了解焊接热循环对钢结构韧性的影响机制，可帮助相关人员通过焊接工艺优化来改善钢结构韧性。

（二）焊接工艺参数优化与韧性改善

从焊接工艺参数入手可改善钢结构的韧性性能。其中在焊接电流、电压和速度的选择上，相关人员要综合考虑其对焊接热输入和热循环的影响。例如适当降低焊接热输入，即通过合理减小焊接电流、提高焊接速度等方式，来控制焊缝及热影响区的冷却速度，使其形成更为细小均匀的组织，如细晶粒的铁素体和珠光体混合组织。由于这种组织具有较好的韧性，因此其能够提高焊缝和热影响区的抗冲击能力，从而提升钢结构整体的韧性^[5]。

与此同时，对于一些对韧性要求较高的钢结构而言，如低温环境下使用的容器、管道等，相关人员还可以采用多层多道焊的工艺方法。在进行多层多道焊时，因为后续焊道对前一层焊道起到了重新加热和细化晶粒的作用，所以此方法能够有效改善焊缝金属的组织，使其韧性得到进一步提升。并且在选择焊接材料

时,相关人员也应选用含有适量合金元素(如镍、钼等)的焊条或焊丝,原因是这些合金元素可以细化晶粒、提高材料的韧性转变温度,从而增强钢结构在低温等特殊工况下的韧性表现。

(三) 焊后热处理对钢结构韧性的恢复与提升

在焊接过程中由于热循环的影响,焊缝及热影响区的组织和性能发生了变化,所以部分区域可能出现韧性下降的情况。但通过焊后热处理,则可以对焊接接头进行适当的加热、保温和冷却处理,预习调整其微观组织,恢复并提升韧性^[9]。实践当中,焊后热处理成为了相关人员改善钢结构韧性的重要手段之一。

具体而言,对于一些中、高强度合金钢钢结构,焊后进行回火处理,相关人员可将焊接接头加热到低于母材相变点的某一温度范围,在保温一定时间后缓慢冷却。其中在回火的过程中,其能够消除焊接残余应力,使焊缝及热影响区的马氏体组织分解,进而形成回火索氏体等韧性较好的组织。如此即可有效地提高焊接接头的韧性,且降低材料的脆性,使其在后续使用过程中能够更好地承受冲击载荷等外力作用,最终将保障钢结构的安全可靠运行。

四、焊接工艺优化对钢结构疲劳性能的影响

(一) 焊接接头疲劳破坏机理与影响因素

焊接接头由于存在焊缝形状的不连续性、焊接缺陷以及残余应力等因素,因此其会产生应力集中现象,即在交变载荷的反复作用下,应力集中处的材料首先产生微观裂纹。而这些微观裂纹在交变应力的持续作用下,则会沿着焊缝金属与母材的界面、热影响区等薄弱部位逐渐扩展,当裂纹扩展到一定程度时,剩余的承载截面就会无法承受外加载荷,进而发生突然断裂,导致钢结构失效^[7]。中影响焊接接头疲劳性能的因素也是众多的,其主要包括了焊接工艺参数、焊接接头的几何形状、焊接缺陷、残余应力水平以及钢结构所处的工作环境(如温度、湿度等)等。

(二) 焊接工艺参数优化与疲劳寿命延长

相关人员合理地控制焊接热输入,能够避免过大的热输入导致焊缝及热影响区组织粗大、性能变差,从而减少应力集中的程度,并提高焊接接头的抗疲劳能力。举例来说,其在焊接薄板钢结构时,采用较小的焊接电流和较快的焊接速度,既能保证焊缝质量,又能使焊缝金属的组织更加细密均匀,进而降低焊缝表面

的粗糙度,并减少应力集中源。此时在交变载荷作用下,可延缓微观裂纹的萌生,最终延长钢结构的疲劳寿命^[8]。

(三) 焊接结构细节设计与疲劳性能提升

焊接结构细节设计对钢结构的疲劳性能有着至关重要的影响,而其中涉及到了焊缝的形状、尺寸以及接头形式等设计。对于承受较大疲劳载荷的焊接结构,相关人员可采用对接接头形式并保证焊缝根部完全熔透,原因是相较于角接头等形式,其应力传递更加均匀,因此疲劳强度更高。同时在结构设计中,需要避免焊缝过于集中布置,即合理分散焊接接头,也有助于降低因焊缝集中导致的整体结构应力集中程度,能够有效地提高钢结构的疲劳性能,延长其在实际使用中的疲劳寿命^[9]。

五、焊接工艺优化与钢结构其他性能的关联

(一) 焊接工艺优化对钢结构抗震性能的影响

焊接工艺优化对其抗震性能有着重要影响,一方面,相关人员通过优化焊接工艺参数和焊接顺序,可减少焊接残余应力和焊接变形,从而使钢结构在地震作用下的整体受力更加均匀合理。另一方面,因为焊接接头的质量直接关系到钢结构在地震反复作用下的可靠性。所以相关人员通过优化焊接工艺,可确保焊缝无缺陷、焊接接头强度和韧性满足要求,以此防止在地震过程中焊接接头处出现裂纹扩展、断裂等情况。^[10]

(二) 焊接工艺优化对钢结构防火性能的影响

钢结构虽然具有诸多优点,但在高温环境下,其强度和刚度会迅速下降,所以其防火性能较差。但焊接工艺优化在一定程度上可以影响钢结构的防火性能。

六、结语

因为钢结构焊接工艺优化对其结构性能有着多方面且深远的影响。所以在实际的钢结构工程应用中,相关人员需要充分地考虑各种因素,且深入地研究焊接工艺优化与结构性能之间的关系,再结合具体的工程要求和使用环境,制定出科学合理的焊接工艺方案。如此一来才能为钢结构的高质量建设和长期稳定运行奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 黄礼琼. 门式刚架厂房钢结构焊接工艺优化[J]. 设备管理与维修, 2017,(09):87-88.
- [2] 彭移华. 梦幻城项目钢结构复杂节点焊接工艺优化[J]. 广船科技, 2017,37(03):33-35.
- [3] 达运社, 达卿文. 钢结构焊接工艺评定的优化方法[J]. 现代制造技术与装备, 2018,(07):139-140.
- [4] 程登, 张发荣, 李正, 等. 建筑钢结构箱形构件电渣焊焊接工艺的优化[J]. 金属加工(热加工), 2022,(10):54-57.
- [5] 李冉, 梅乾龙, 赵通, 等. 船体结构焊接工艺参数优化研究[J]. 机械设计与制造工程, 2022,51(06):43-46.
- [6] 王朋, 黄斌. 输电杆塔挂点结构焊接工艺分析与优化[J]. 焊接技术, 2022,51(03):68-71.
- [7] 于洋, 吕安松, 王尚典. 轨道车辆车顶钢结构焊接工艺分析与优化[J]. 交通节能环保, 2019,15(06):28-31.
- [8] 范瑞瑞, 杨安杰, 张林涛. 复杂项目劲性结构梁柱节点施工研究[J]. 中华建设, 2023,(09):143-145.
- [9] 王雄. 钢结构焊接工艺优化算法及其推理机制研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2018,(04):93.
- [10] 贾晓喆. 钢结构焊接工艺优化算法及其推理机制研究[D]. 南京航空航天大学, 2015.