

# 焊接热输入对核级钢焊缝组织性能影响分析

吕阳 赵瑞贵

中国电建集团核电工程有限公司 山东济南 250000

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16049

**[摘要]** 焊接热输入是影响核级钢焊缝组织与性能的关键因素。随着热输入的增加,焊缝金属晶粒明显粗化,热影响区宽度增大,组织由细密铁素体逐渐向粗大魏氏组织转变。高热输入易引起组织不均,降低焊缝韧性和抗裂性能,甚至诱发热裂纹或冷裂纹风险。适度热输入可促进晶粒细化,提升焊接接头强度与韧性匹配。通过对不同热输入下的组织形貌及力学性能对比,揭示热输入对核级钢焊缝组织演变与性能变化规律,指导核电安全结构焊接工艺优化。

**[关键词]** 核级钢; 焊接热输入; 焊缝组织; 力学性能; 热影响区

## 引言:

核电设备对材料焊接质量提出了极高要求,焊缝的组织与性能直接关系到其服役安全与寿命。焊接热输入作为决定焊缝成形及组织演变的核心参数,其变化对核级钢焊接接头的力学性能影响显著。不同热输入条件下形成的组织差异,不仅影响接头的强度和韧性,也可能诱发裂纹等缺陷。探索热输入与焊缝组织性能之间的关系,对于实现焊接工艺的优化与安全结构的保障具有重要意义。

## 一、焊接热输入的定义及其在核级钢焊接中的关键作用

焊接热输入是指单位长度焊缝在焊接过程中所吸收的热量,通常以能量密度(J/mm)衡量,是焊接工艺参数(电流、电压、焊接速度等)共同作用的结果。热输入的大小直接决定了焊缝熔池的热循环过程,进而影响焊缝金属的凝固速度、组织形成以及热影响区的范围与冷却速率。在核级钢的焊接中,由于该类材料通常用于高温高压等极端服役环境,任何微小的组织变化或性能波动都可能导致严重后果,因此对热输入的控制要求更为严苛。热输入的不同不仅影响焊接接头的成形质量,还对组织的稳定性、应力分布以及后续服役的结构完整性起到决定性作用。

在实际焊接过程中,热输入的变化对核级钢焊缝金属的组织演化具有显著影响。较低热输入通常会导致焊缝区域的快速冷却,有助于获得细小而均匀的铁素体与贝氏体组织,从而提升焊缝的强度与韧性。但冷却速度过快也可能引起硬度升高、脆性增强,甚至形成马氏体组织,埋下冷裂纹的隐患。而热输入过高则会造成熔池冷却速度减缓,使晶粒明显粗化,魏氏组织增多,降低焊缝的冲击韧性和抗裂能力。此

外,热影响区宽度的增加也会使应力集中程度提高,焊接残余应力加剧,从而诱发结构应力腐蚀和服役失效。核级钢通常含有多种合金元素,这些元素在不同热输入下的扩散、再结晶与析出行为不同,也进一步加剧了焊缝组织的不均性。

在核级设备制造与维修中,合理控制焊接热输入成为焊接质量控制的关键环节。通过科学设定焊接电流、电压与焊接速度,精确控制每道焊缝的热输入量,可有效调控焊接接头的组织结构,避免晶粒粗化和脆性相的生成,从源头上提升焊缝综合性能。此外,热输入的优化设计还需结合焊接材料特性、工件厚度及焊接位置等因素综合考量。在核能工程中,对焊接接头的性能要求通常包括高韧性、高疲劳强度以及良好的抗腐蚀能力,任何焊接缺陷都可能对结构的长期稳定性造成致命影响。因此,对热输入参数的深入研究与控制策略的不断优化,不仅是提升核级钢焊接质量的核心手段,也是确保核电站运行安全与延长服役寿命的重要保障。

## 二、热输入对核级钢焊缝金属显微组织的影响规律

焊接热输入对核级钢焊缝金属显微组织的演变过程具有决定性作用,是影响焊缝力学性能和服役可靠性的关键因素之一。在焊接过程中,金属熔池经历高温熔化、凝固和快速冷却,焊缝金属的显微组织随热输入的变化而呈现出不同形态。当热输入较低时,熔池冷却速度较快,金属组织趋向于细小均匀,主要以铁素体和贝氏体为主,能够有效抑制晶粒粗化。这类组织在力学性能方面表现出较高的强度和良好的韧性,适合用于对接头性能要求较高的核电设备结构中。特别是在小热输入条件下形成的等轴铁素体与细片状贝氏体组织,不仅组织致密,还能提高焊缝区抗裂纹扩展的能力。

然而,当焊接热输入增加,金属熔池的高温停留时间延长,冷却速度显著降低,显微组织开始发生明显变化。过高的热输入会导致焊缝金属晶粒长大,出现粗大的柱状晶和魏氏组织,显著削弱焊缝的冲击韧性与低温性能。魏氏组织的形成往往伴随着硬度不均和裂纹敏感性增强,特别是在多层多道焊接中,热输入的不均匀性会加剧组织差异,导致局部区域性能波动。在核级钢中,这种性能的不一致会为结构服役安全埋下隐患。此外,焊缝中的残余奥氏体含量也随着热输入升高而增加,虽然一定比例的残余奥氏体可提高塑性,但其不稳定性会在服役过程中转变为马氏体,诱发脆性断裂风险。因此,在核级钢的焊接中,必须警惕热输入对组织稳定性的长期影响。

热输入对金属组织演变规律的影响还体现在晶界特征和第二相析出行为上。较低热输入时,晶界数量多、取向分散,有利于阻止裂纹沿晶界扩展;而高热输入导致晶粒粗大、晶界减少,裂纹更容易发生穿晶或沿晶扩展,降低焊缝的整体抗裂能力。在微观尺度上,合金元素如Mo、Cr、Ni在不同热输入条件下的扩散速率与分布行为亦会发生变化,从而影响析出相的种类、尺寸和分布位置。低热输入有利于形成细小弥散的碳化物与析出强化相,而高热输入则易产生粗大或聚集状析出物,造成应力集中,诱发微裂纹。因此,在核级钢焊接过程中,必须通过合理调控热输入范围,使焊缝显微组织保持在稳定、细密、均匀的状态,才能实现焊接接头性能的最优化,为核电设备的长期安全运行提供可靠支撑。

### 三、热影响区组织演变与性能变化的关联分析

热影响区(HAZ)是焊接过程中未完全熔化但受到热循环作用而产生显著组织变化的区域,其组织演变和性能变化与焊接热输入密切相关。对于核级钢这类对结构完整性要求极高的材料,热影响区的微观结构变化不仅影响焊缝整体性能,还对服役安全性产生深远影响。随着热输入的增加,热影响区内的温度梯度和加热时间显著变化,导致组织由原始的等轴铁素体逐渐演变为粗大晶粒区、部分重结晶区以及过热区等不同亚区,每一亚区的组织特点与形成机制各异。高热输入条件下,热影响区中的粗晶区尤为明显,晶粒显著长大,降低了材料的屈服强度和断裂韧性。同时,这些区域由于加热温度接近或超过再结晶温度,原有组织结构遭到破坏,原始晶界消失,新的粗大晶粒边界形成,增加了裂纹源的潜在

位置。

组织的这种演变直接导致性能的变化,主要体现在冲击韧性下降、强度降低和硬度波动加剧等方面。热影响区内,由于不同区域经历的热循环不同,其组织和性能呈现明显的不均匀性。尤其在粗晶区,魏氏组织和粗大柱状晶的生成显著增加了脆性断裂的风险,这对核电设备在高温、高压环境下长期服役构成威胁。同时,局部再奥氏体化区可能在冷却过程中转变为马氏体组织,虽然具有较高硬度,但也显著降低了材料的塑性和断裂韧性。相反,若热输入控制得当,使热影响区保持细小等轴晶或细粒贝氏体组织,可在较大程度上保持良好的综合力学性能。性能变化的另一个方面还涉及焊接残余应力的分布,高热输入会导致热影响区局部温度升高、冷却缓慢,使残余拉应力积聚,降低抗疲劳能力,诱发热疲劳裂纹或应力腐蚀裂纹。

合金元素在热影响区的再分布和扩散行为也加剧了组织的不稳定性。核级钢中含有的Cr、Mo、Ni等元素在焊接加热过程中可能产生偏析,形成局部强化或脆化相。例如,某些热输入条件下可能促进碳化物沿晶界析出,形成脆化带,严重时会导致沿晶断裂现象。低热输入焊接虽可减小热影响区宽度,但若冷却速度控制不当,同样可能引发组织不稳定。为应对这一问题,需结合热输入调控与焊后热处理技术,强化晶粒细化和应力释放控制。此外,现代高性能焊接技术如激光焊、窄间隙焊等在控制热影响区范围和提升组织稳定性方面具有良好效果。

### 四、不同热输入条件下核级钢焊缝力学性能对比研究

焊缝的力学性能是衡量焊接质量优劣的重要指标,而热输入作为决定焊接热循环特征的关键参数,对核级钢焊缝的强度、韧性、硬度等性能表现产生显著影响。在低热输入条件下,焊缝区域冷却速度快,形成的金属组织以细小等轴铁素体和贝氏体为主。这类组织结构致密、晶粒细小,有利于提高焊缝的屈服强度和抗拉强度,同时具备良好的断裂韧性和疲劳性能。低热输入还能有效控制焊缝及热影响区的残余应力水平,减少微裂纹和硬化区的出现,从而增强结构的整体稳定性。尤其是在多道焊接过程中,低热输入能够避免热积聚带来的二次过热效应,为实现均匀稳定的焊接接头创造了有利条件。

而在高热输入条件下,焊缝金属由于高温停留时间延长,

冷却速度减慢,易形成粗大的柱状晶和魏氏组织,导致晶粒边界明显、组织分布不均。此类组织虽然在一定程度上有助于提高塑性,但也大幅削弱了抗冲击能力,使焊缝的低温韧性显著下降。尤其是在核级钢中,粗化的晶粒和脆性组织还会降低裂纹扩展阻力,导致焊接接头在复杂载荷或热应力条件下容易发生断裂。同时,高热输入还易诱发合金元素的偏析和非金属夹杂的偏聚现象,这些组织缺陷成为应力集中的源点,进一步削弱焊缝的疲劳寿命和抗腐蚀能力。在某些焊接环境下,高热输入甚至可能导致熔合区组织严重不匹配,诱发裂纹沿熔合线扩展,形成失效隐患。

不同热输入条件下核级钢焊缝力学性能的差异,体现了焊接热过程对微观组织控制的敏感性。在焊接实际应用中,需根据工程结构的受力特点、服役环境以及钢材本身的性能要求,选择合适的热输入参数。通过焊接试验与性能测试的对比,可以确定最佳热输入范围,使焊缝金属与热影响区在强度与韧性之间达到合理匹配,提升整体结构的安全性与服役可靠性。此外,结合热模拟技术与有限元分析手段,对不同热输入条件下的温度场、应力场及组织演变规律进行预测与优化,有助于实现核级钢焊接工艺的科学化、精准化控制,确保核电装备的长期稳定运行。

### 五、核级钢焊接工艺参数优化与热输入控制策略

核级钢作为用于核电设备关键部位的重要材料,其焊接工艺参数的合理设定对于确保结构安全和服役稳定性具有重要意义。热输入作为工艺参数中最核心的变量之一,其控制水平直接影响焊缝金属的组织演变与性能表现。在实际焊接中,热输入的大小受到电流、电压及焊接速度等因素共同作用,因此,合理选择并协调各项工艺参数至关重要。应通过前期焊接工艺评定(WPS)试验,结合不同热输入条件下的组织分析和性能测试,确定适用于核级钢的最优热输入范围,以实现焊缝强度、韧性和抗裂性能的协调统一。

为了有效控制热输入,需优先选用能量集中、热影响区小的焊接方法,如TIG焊(钨极氩弧焊)、窄间隙多层焊、埋弧焊及激光焊等。同时,焊接时应根据母材厚度、焊缝位置和接头形式合理设定层间温度与道间时间,避免焊缝局部过热导致热积聚效应。在多道焊中,可采取控制每层道次热输入的方式,实现焊接热影响区的组织一致性与性能稳定性。此外,为了防止热输入偏高带来的组织粗化和性能劣化,还

可在焊后实施回火处理或正火工艺,以细化晶粒、释放残余应力,恢复焊缝和热影响区的综合性能。

在实际工程应用中,核级钢焊接工艺的优化还需综合考虑施工环境、焊接位置、焊接材料的匹配性以及结构的复杂程度等因素,灵活选用热输入控制策略。借助现代焊接模拟技术和数字化焊接平台,可实时监控热输入变化,准确调整工艺参数,提高焊接过程的可控性和一致性。此外,还应注重焊接人员的技术培训和标准化操作流程的执行,确保工艺参数在实际应用中不因人为偏差而失控。只有通过全流程、全要素的工艺优化与热输入管理,才能最大限度发挥核级钢材料性能优势,为核能工程的安全运行提供可靠保障。

### 结语:

焊接热输入对核级钢焊缝组织与性能的影响贯穿焊接全过程,是决定接头质量与结构安全的核心因素。通过对不同热输入条件下显微组织演变、热影响区特征及力学性能的系统分析,可为工艺参数优化与控制策略提供理论依据。合理控制热输入,不仅有助于细化组织、提升性能,还能增强焊接接头的稳定性与耐久性。科学、精细的热输入管理是确保核级钢焊接质量的关键保障。

### [参考文献]

- [1]张泽浩,肖明颖,张磊.热输入对Inco1oy800H合金焊接接头显微组织和力学性能的影响[J].焊接技术,2025,54(04):52-57+146.DOI:10.13846/j.cnki.cn12-1070/tg.2025.04.005.
- [2]袁晓东,杨凤琦,刘志军,等.热输入对Q355D中厚板焊接接头组织及力学性能的影响[J/OL].电焊机,1-9[2025-06-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1278.tm.20250508.1456.002.html>.
- [3]冯静茹,刘栋,张可召,等.热输入对TB9钛合金激光焊接接头显微组织的影响[J].电焊机,2025,55(05):121-128.
- [4]汤村江,安同邦,彭云,等.焊接热输入对690 MPa级HSLA钢焊缝金属组织与力学性能的影响[J].焊接学报,2024,45(09):110-119.
- [5]王高见,叶延洪,康丹丹,等.焊接热输入对高速列车转向架耐候钢焊缝金属微观组织、力学性能及腐蚀行为的影响[J].机械工程学报,2025,61(08):148-158.