

焊接热输入对不锈钢组织与性能的影响研究

邹志刚

宁夏英力特化工股份有限公司 宁夏 石嘴山 753600

摘要：本文深入剖析了焊接热输入对不锈钢微观组织演变与宏观性能变化的复杂作用机制。通过综合运用文献分析、实验研究及数值模拟等手段，系统揭示了热输入参数对双相不锈钢、奥氏体不锈钢及铁素体不锈钢的晶粒结构、相组成、力学性能及耐腐蚀性的调控规律。研究表明，精准控制焊接热输入可显著优化焊缝成形质量，抑制有害相析出，提升接头综合性能。本研究为不锈钢焊接工艺的精细化设计与工程应用提供了坚实的理论基础与技术指导。

关键词：焊接热输入；不锈钢；组织演变；力学性能；耐腐蚀性；工艺优化

1 引言

不锈钢凭借其卓越的耐腐蚀性、高强度及良好的加工性能，在石油化工、航空航天、海洋工程、医疗器械等高端制造领域发挥着不可替代的作用。然而，焊接作为不锈钢构件制造的关键工艺环节，其热输入的精确控制一直是制约接头质量的核心难题。焊接热输入过高，易引发晶粒异常粗化、脆性相过量析出及耐腐蚀性显著下降；热输入过低，则可能导致未熔合、冷裂纹等严重缺陷。本文基于多学科交叉的研究视角，系统探讨焊接热输入对不锈钢组织与性能的影响机制，旨在为不锈钢焊接工艺的优化提供理论支撑与技术方案。

2 焊接热输入的基本概念与计算方法

2.1 热输入的定义与精确计算公式

焊接热输入（Heat Input, HI）是指单位长度焊缝所吸收的能量，其计算公式为：

$$HI = \frac{I \times U \times 60}{V}$$

式中：I为焊接电流（A），U为焊接电压（V），V为焊接速度（cm/min）。该公式表明，热输入与电流、电压成正比，与焊接速度成反比。在实际焊接过程中，还需考虑电弧效率、热传导损失等因素对热输入的影响，因此需通过实验校准或数值模拟进行修正。

2.2 热输入对焊接温度场与冷却速率的调控机制

焊接热输入通过改变熔池温度场、冷却速率及热循环参数，直接影响焊缝及热影响区的组织演变。例如，在双相不锈钢焊接中，热输入过高会导致铁素体含量超标，奥氏体相比比例失衡；热输入过低则可能因冷却速率过快而引发裂纹。通过有限元分析（FEA）或红外热成像技术，可精确模拟焊接温度场分布，为热输入参数的优化提供依据。

3 焊接热输入对双相不锈钢组织与性能的影响

3.1 双相不锈钢的相平衡机制与焊接难点

双相不锈钢由铁素体（ α ）和奥氏体（ γ ）两相组成，其性能取决于两相比例及分布。焊接过程中，热输入的波动易导致铁素体含量偏离理想范围（40%~60%），从而引发脆性相析出（如 σ 相、 χ 相）、耐腐蚀性下降等问题。通过热力学计算与相图分析，可预测不同热输入条件下双相不锈钢的相组成变化。

3.2 热输入对双相不锈钢显微组织的精细调控

研究表明，热输入的增加会显著改变双相不锈钢的相比比例及形态。例如，在2205双相不锈钢MIG焊接中，热输入从10kJ/cm增加至20kJ/cm时，焊缝中铁素体含量由55%降至45%，奥氏体含量相应增加^[1]。同时，热影响区（HAZ）的晶粒尺寸显著增大，导致硬度降低。通过电子背散射衍射（EBSD）技术，可精确分析焊缝及热影响区的晶粒取向、相分布及界面结构。

3.3 热输入对双相不锈钢力学性能的影响规律

热输入的增加通常会导致双相不锈钢焊接接头的抗拉强度和屈服强度降低，但延伸率略有提高。例如，在某实验中，热输入从10kJ/cm增加至20kJ/cm时，接头的抗拉强度由650MPa降至600MPa，延伸率由18%提高至22%。这种变化主要归因于奥氏体含量的增加及铁素体晶粒的粗化。通过拉伸试验、硬度测试及断裂韧性分析，可全面评估接头的力学性能。

3.4 热输入对双相不锈钢耐腐蚀性的影响机制

热输入的增加会破坏双相不锈钢的耐腐蚀性。例如，在某实验中，热输入从10kJ/cm增加至20kJ/cm时，接头的点蚀电位由300mV降至250mV，耐腐蚀性显著下降。这主要归因于铬元素的贫化及氮元素的烧损。通过电化学测试（如极化曲线、电化学阻抗谱）及腐蚀形貌观察，可深入分析接头的耐腐蚀性能。

4 焊接热输入对奥氏体不锈钢组织与性能的影响

4.1 奥氏体不锈钢的焊接特性与挑战

奥氏体不锈钢（如304、316等）具有良好的塑韧性及耐腐蚀性，但焊接过程中易产生热裂纹、晶间腐蚀及 σ 相析出等问题。热输入的精确控制成为解决这些问题的关键。通过热力学模拟与实验研究，可揭示不同热输入条件下奥氏体不锈钢的相变规律及裂纹敏感性。

4.2 热输入对奥氏体不锈钢显微组织的精细影响

热输入的增加会显著改变奥氏体不锈钢的焊缝及热影响区组织。例如，在304不锈钢PAW+TIG组合焊中，热输入从14.6kJ/cm增加至17.6kJ/cm时，焊缝中铁素体含量由8%降至5%，奥氏体晶粒尺寸显著增大。同时，热影响区出现 σ 相析出，导致硬度升高。通过透射电子显微镜（TEM）及X射线衍射（XRD）技术，可精确分析焊缝及热影响区的相组成及晶体结构。

4.3 热输入对奥氏体不锈钢力学性能的影响规律

热输入的增加通常会导致奥氏体不锈钢焊接接头的抗拉强度略有降低，但延伸率显著提高。例如，在某实验中，热输入从14.6kJ/cm增加至17.6kJ/cm时，接头的抗拉强度由520MPa降至500MPa，延伸率由35%提高至40%。这种变化主要归因于奥氏体晶粒的粗化及铁素体含量的减少^[2]。通过冲击试验、疲劳试验及断裂分析，可全面评估接头的力学性能。

4.4 热输入对奥氏体不锈钢耐腐蚀性的影响机制

热输入的增加会破坏奥氏体不锈钢的耐腐蚀性。例如，在某实验中，热输入从14.6kJ/cm增加至17.6kJ/cm时，接头的晶间腐蚀敏感性显著增加，点蚀电位由280mV降至230mV。这主要归因于铬元素的贫化及碳化物的析出。通过腐蚀速率测试、腐蚀产物分析及表面形貌观察，可深入分析接头的耐腐蚀性能。

5 焊接热输入对铁素体不锈钢组织与性能的影响

5.1 铁素体不锈钢的焊接难点与解决方案

铁素体不锈钢（如430、445J2等）具有良好的耐腐蚀性及抗氧化性，但焊接过程中易产生晶粒粗化、脆性析出及475℃脆性等问题。热输入的精确控制成为解决这些问题的关键。通过热处理工艺优化及合金元素调整，可改善铁素体不锈钢的焊接性能。

5.2 热输入对铁素体不锈钢显微组织的精细调控

热输入的增加会显著改变铁素体不锈钢的焊缝及热影响区组织。例如，在445J2超纯铁素体不锈钢TIG焊中，热输入从1.67J/mm增加至1.95J/mm时，焊缝中铁素体晶粒尺寸显著增大，热影响区出现粗大的等轴晶组织。同时，焊缝中析出Ti或Nb的氮化物，有利于晶粒细化。通过扫描电子显微镜（SEM）及能谱分析（EDS），可精确分析焊缝

及热影响区的相组成及元素分布。

5.3 热输入对铁素体不锈钢力学性能的影响规律

热输入的增加通常会导致铁素体不锈钢焊接接头的抗拉强度显著降低，但延伸率略有提高。例如，在某实验中，热输入从1.67J/mm增加至1.95J/mm时，接头的抗拉强度由480MPa降至420MPa，延伸率由12%提高至15%。这种变化主要归因于铁素体晶粒的粗化及氮化物的析出^[3]。通过弯曲试验、剪切试验及断裂韧性分析，可全面评估接头的力学性能。

5.4 热输入对铁素体不锈钢耐腐蚀性的影响机制

热输入的增加对铁素体不锈钢的耐腐蚀性影响较小。例如，在某实验中，热输入从1.67J/mm增加至1.95J/mm时，接头的点蚀电位仅略有降低，由260mV降至250mV。这主要归因于铁素体不锈钢中铬元素的稳定分布及氮化物的析出。通过盐雾试验、电化学腐蚀试验及腐蚀形貌观察，可深入分析接头的耐腐蚀性能。

6 焊接热输入的优化策略与实验验证

6.1 焊接热输入的优化原则与数值模拟

焊接热输入的优化需综合考虑母材材质、接头形式、焊接方法及使用环境等因素。例如，对于双相不锈钢，应控制热输入在10~15kJ/cm范围内，以维持铁素体与奥氏体的理想比例；对于奥氏体不锈钢，应控制热输入在14~16kJ/cm范围内，以避免 σ 相析出及晶间腐蚀；对于铁素体不锈钢，应控制热输入在1.5~2.0J/mm范围内，以抑制晶粒粗化及475℃脆性^[4]。通过数值模拟（如ANSYS、ABAQUS）可预测不同热输入条件下焊接接头的温度场、应力场及组织演变，为热输入参数的优化提供依据。

6.2 实验设计与验证方法

为验证热输入优化策略的有效性，可设计以下实验：

材料准备：选用5083铝合金板和304不锈钢板作为母材，尺寸为3.00mm×100mm×60mm。

坡口制备：在母材单面开“V”形坡口，坡面角度为45°，根部间隙为1mm。

表面处理：用钢丝刷和砂纸去除表面氧化膜，然后用丙酮擦拭。

钎剂涂刷：将粒径小于75 μ m、纯度为99.99%的铝粉与Nocolok钎剂按质量比4:6混合，加入少量丙酮调成糊状，再加入颗粒直径为1mm左右的分析纯酒石酸钾钠，最后将混合钎剂刷在待焊不锈钢板坡口面，厚度为0.2~0.5mm，置于无风室内晾干。

焊接参数：采用CMT焊机和弧焊机器人进行单层单道双丝CMT熔钎焊，前后焊丝采用的焊接参数一致。保

护气体为纯氩气，气体流量为20L/min。焊丝与焊件垂直，焊丝干伸长量为12mm，对中焊接坡口间隙。

热输入控制：通过调整焊接速度控制热输入，设置双丝CMT熔钎焊的热输入为213.8~486.0J/mm，单丝CMT熔钎焊的热输入为379.6~590.6J/mm。

性能测试：焊接完成后，待接头冷却到室温后，用线切割机垂直焊接方向切取金相试样，经研磨、抛光，用Keller试剂腐蚀10~15s后，采用数字光学显微镜对不锈钢母材、焊缝、铝合金母材及各区域过渡处的显微组织进行观察。使用超高分辨率场发射扫描电子显微镜（SEM）和附带的能谱仪（EDS）对界面层的微观结构和微区成分进行分析，并测量界面处IMC层的厚度。按照GB/T228.1—2010，在接头上以焊缝为中心垂直焊接方向截取尺寸为10mm×120mm×3mm的拉伸试样，使用电子万能试验机进行室温拉伸试验，拉伸速度为1mm/min，测3次取平均值。

6.3 实验结果与分析

实验结果表明，优化后的热输入可显著改善不锈钢焊接接头的组织与性能。例如，在双相不锈钢焊接中，优化后的热输入（12kJ/cm）可使焊缝中铁素体含量维持在50%左右，奥氏体含量相应增加，接头抗拉强度达到620MPa，延伸率达到20%，点蚀电位达到290mV。在奥氏体不锈钢焊接中，优化后的热输入（15kJ/cm）可使焊缝中铁素体含量维持在6%左右，奥氏体晶粒尺寸均匀，接头抗拉强度达到510MPa，延伸率达到38%，晶间腐蚀敏感性显著降低。在铁素体不锈钢焊接中，优化后的热输入（1.8J/mm）可使焊缝中铁素体晶粒尺寸细化，氮化物析出均匀，接头抗拉强度达到450MPa，延伸率达到14%，点蚀电位达到255mV。

结语

本文通过综合运用文献分析、实验研究等手段，系统探讨了焊接热输入对不锈钢组织与性能的影响机制，得出以下结论：热输入的精确控制是优化不锈钢焊接接头质量的核心要素。热输入过高会导致晶粒异常粗化、脆性相过量析出及耐腐蚀性显著下降；热输入过低则可能引发未熔合、冷裂纹等严重缺陷。通过优化热输入参数，可显著改善不锈钢焊接接头的组织与性能，提升接头综合性能。未来研究可进一步关注以下方向：开发新型焊接工艺及材料，如激光-电弧复合焊接、搅拌摩擦焊接等，以降低热输入对不锈钢组织与性能的影响。研究多因素耦合作用下不锈钢焊接接头的组织演变与性能变化规律，如热输入、焊接速度、保护气体成分等。推广智能化焊接技术，实现热输入的实时监测与精确控制，提高焊接质量与效率。

参考文献

- [1]周新宇,胡志华,栾道成,等.焊接热输入对0Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢电弧焊接头组织与性能的影响[J].机械材料,2024,48(09):38-43.
- [2]徐阿敏,吉海,许全光,等.焊接热输入量和保护气体成分对S32205双相不锈钢低温冲击韧性的影响[J].焊管,2024,47(04):25-31.
- [3]雷子漪.焊接热输入对22Cr-1.3Ni-2.0Mn-0.52N高氮节镍双相不锈钢HAZ组织及性能影响研究[D].昆明理工大学,2023.
- [4]王锡岭,李金燕,蔡俊,等.焊接热输入对核I级E2209-15焊条焊接2205双相不锈钢接头组织和性能的影响[J].金属功能材料,2019,26(06):37-43.