

高强钢焊接热影响区软化问题的工艺优化研究

王绍云

涿鹿博泰钢结构工程有限公司 河北 张家口 涿鹿县 075600

【摘要】：高强钢在现代工业中应用广泛，但其焊接热影响区软化问题严重影响焊接接头性能。本研究聚焦于高强钢焊接热影响区软化现象，系统分析了导致软化的内在机制，包括组织转变、析出相变化等因素。通过大量实验，深入探究焊接工艺参数（如焊接电流、电压、焊接速度等）、母材成分以及焊后处理工艺对热影响区软化程度的影响规律。在此基础上，提出一系列针对性的工艺优化措施，如优化焊接热输入、调整合金元素配比、采用合适的焊后热处理等。研究结果表明，这些优化措施能有效抑制高强钢焊接热影响区的软化，显著提升焊接接头的综合力学性能，为高强钢在实际工程中的可靠应用提供有力技术支撑。

【关键词】：高强钢；焊接热影响区；软化问题；工艺优化；力学性能

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.021

引言

随着工业的飞速发展，高强钢凭借其高比强度、良好的韧性等特性，在各类大型结构件中应用愈发广泛。焊接作为常用连接手段，在赋予结构完整性的热影响区软化问题随之而来。软化不仅降低接头强度，还可能引发结构早期失效，威胁工程安全。深入研究高强钢焊接热影响区软化问题，并探寻有效的工艺优化方法，对拓展高强钢应用范围、提升结构可靠性意义重大。

1 高强钢焊接热影响区软化的机制剖析

1.1 热循环引发的组织转变

高强钢焊接时，热影响区在焊接热源的作用下经历复杂的热循环过程，不同区域因受热程度差异，组织转变呈现出明显不同。在靠近焊缝的过热区，由于峰值温度极高，远超过钢材的奥氏体化温度，使得钢中的晶粒急剧长大。原本通过轧制或热处理获得的细晶强化效果因晶粒的异常长大而丧失，这直接导致该区域强度大幅降低。而在相变重结晶区，焊接过程中奥氏体化不完全，在随后的冷却过程中，形成的组织存在明显的不均匀性。这种不均匀的组织状态，使得该区域在受力时无法均匀承载，从而造成一定程度的软化，影响整体力学性能。

1.2 析出相变化的影响

从析出相角度来看，高强钢中的强化相在焊接高温环境下会发生显著变化。部分强化相在高温下会溶解进入奥氏体中，而在随后的冷却过程中，由于冷却速度、时间等因素的影响，这些溶解的强化相未能充分析出。析出强化是高强钢获得高强度的重要机制之一，强化相的减少使得析出强化作用被弱化，进而加剧了热影响区的软化程度。析出相的分布状态对高强

钢性能也有重要影响，焊接过程中析出相的变化不仅体现在数量上，其分布也会变得紊乱，进一步降低了钢材的性能。

1.3 间隙原子扩散的作用

碳、氮等间隙原子在高强钢焊接过程中的扩散与重新分布，也是导致热影响区软化的重要因素。在焊接高温条件下，间隙原子的活性大大增强，开始进行快速扩散。这些原子的扩散会改变固溶强化效果，因为固溶强化依赖于间隙原子与位错的相互作用，原子分布的改变使得这种相互作用减弱。间隙原子的扩散还会导致局部成分不均匀，形成微观区域的成分差异，这种差异会在冷却过程中进一步影响组织转变，从而对热影响区的性能产生复杂影响，最终导致热影响区出现软化现象。

2 焊接工艺参数对热影响区软化的影响

2.1 焊接电流的关键作用

焊接电流是影响热影响区软化程度的重要参数之一。当焊接电流增大时，输入到焊接接头的热量显著增多。大量的热量使得热影响区的宽度增加，高温停留时间也随之延长。在高温环境下，钢材中的原子活性增强，晶粒生长的驱动力增大，晶粒长大更为明显。晶粒的粗化会严重削弱钢材的强度和韧性，导致热影响区的软化程度加剧。而且，过大的焊接电流还可能使焊缝金属的化学成分发生变化，进一步影响焊接接头的性能，使得热影响区的软化问题更加突出。

2.2 电压与焊接速度的影响

电压的变化虽然不直接决定热输入量，但它会影响电弧特性，进而间接影响热输入与能量分布。过高的电压会使电弧拉长，电弧的加热面积增大，导致热影响区更容易出现过热现象。过热会促使晶粒长大，

加剧热影响区的软化。而焊接速度与热输入呈反比关系，焊接速度过快时，熔池冷却速度会急剧加快，可能产生淬硬组织。虽然淬硬组织会使硬度有所提高，但同时会导致韧性显著降低，使焊接接头更容易发生脆性断裂。相反，焊接速度过慢时，热输入过大，热影响区在高温下停留时间过长，同样会加剧热影响区的软化，降低焊接接头的综合性能。

2.3 热输入集中程度的差异

焊接热输入的集中程度对热影响区软化也有着至关重要的影响。不同的焊接方法具有不同的能量分布特点，例如激光焊接，其能量高度集中，热量能够迅速传递并熔化金属，热影响区相对较窄。较窄的热影响区意味着受热范围小，高温停留时间短，从而在一定程度上减轻了软化现象。而传统电弧焊，其能量分布较为分散，热量在焊接区域扩散范围较大，热影响区相对较宽，高温停留时间长，使得热影响区软化问题相对突出。合理选择焊接方法，控制热输入的集中程度，是缓解高强钢焊接热影响区软化的关键所在。

3 母材成分对热影响区软化的作用

3.1 碳含量的显著影响

在**高强钢**焊接热影响区的组织与性能演变过程中，碳元素扮演着核心角色。碳含量的变化如同调节钢材微观结构的旋钮，直接左右着热影响区的性能走向。当碳含量逐步攀升，钢材在焊接冷却环节的淬硬趋势愈发明显。焊接过程中，熔池周边区域经历快速加热与冷却循环，高碳含量使得奥氏体向马氏体转变的临界冷却速度降低，大量硬脆的马氏体组织在焊缝附近形成。这些片状或板条状的马氏体结构，因其内部高度的晶格畸变和位错密度，虽赋予钢材极高的硬度，却极大削弱了韧性储备。一旦承受外部载荷或内部残余应力，马氏体区域极易成为裂纹萌生与扩展的起点。碳元素的活跃性在高温环境下表现得尤为突出。焊接时，高温梯度驱使碳在奥氏体晶界与晶内快速扩散。这种扩散行为加剧了组织的不均匀性：一方面，碳富集区域形成粗大的先共析铁素体或珠光体团，而贫碳区域则呈现低碳马氏体特征；另一方面，碳的扩散导致局部化学成分波动，使得相变进程出现差异，最终在热影响区形成混杂的组织结构。这种复杂的组织梯度不仅降低了焊接接头的强度匹配性，还在应力集中区域诱发塑性变形失配，严重威胁焊接结构的长期服役安全。

3.2 合金元素的双重作用

锰、铬、镍等合金元素在**高强钢**体系中对热影响

区性能的影响呈现显著的双面性。从积极层面来看，这些合金元素通过固溶强化机制，以原子形式溶解于铁素体基体，阻碍位错运动，从而提升钢材强度。部分合金元素（如锰）能够降低铁素体-奥氏体相变温度，细化奥氏体晶粒，为后续冷却过程中的组织转变奠定良好基础。在焊接冷却阶段，适量的合金元素可有效抑制先共析铁素体和珠光体的过早形成，促使过冷奥氏体向贝氏体或低碳马氏体转变。这些具有优异强韧性的组织形态，使得焊接接头在保持高强度的具备足够的抗冲击和抗裂纹扩展能力。

3.3 微合金元素的抑制作用

铌、钛、钒等微合金元素凭借与碳、氮的强结合力，在**高强钢**焊接热影响区形成纳米级碳氮化物，发挥钉扎晶界、细化晶粒的关键作用。铌、钛、钒等微合金元素与碳、氮结合形成纳米级碳氮化物，弥散分布在**高强钢**焊接热影响区，像微观锚点钉扎奥氏体晶界，抑制晶粒长大，保持细晶结构。细晶强化通过增大晶界面积阻碍位错运动，提升强度硬度；晶界还能吸收偏转裂纹能量，改善韧性与抗疲劳性。微合金元素可优化相变，促进强韧性优异的针状铁素体形成。精准调控微合金元素，能构建抗软化体系，增强热影响区综合性能与服役可靠性。

4 工艺优化措施的提出与实施

4.1 焊接工艺参数的优化

在焊接工艺参数优化方面，采用低热输入焊接方法是缓解**高强钢**焊接热影响区软化的有效手段。脉冲焊接作为一种典型的低热输入焊接方法，通过精确控制脉冲频率、脉宽等参数，能够在保证焊缝质量的前提下，减少热影响区的受热程度。在脉冲焊接过程中，焊接电流以周期性的脉冲形式变化，在脉冲峰值阶段完成焊接熔池的形成和填充，而在脉冲基值阶段，电流较小，热量输入低，有利于熔池的冷却和结晶。合理选择焊接顺序与方向也至关重要。通过合理规划焊接顺序，利用焊接过程中的热叠加效应，可以降低整体热输入，使热影响区在焊接过程中受热更加均匀，从而减轻热影响区的软化程度，提高焊接接头的性能。

4.2 母材成分的优化

针对母材成分的深入研究和分析，研发新型合金体系已经成为提升**高强钢**焊接热影响区抗软化能力的一个重要方向。为了满足**高强钢**在实际应用中的性能要求，我们必须对合金元素的配比进行细致的优化。通过适当降低碳含量，我们可以有效减少热影响区的淬硬倾向，从而降低形成硬脆马氏体组织的风险，进

而显著改善热影响区的韧性。增加微合金元素的含量，可以利用这些微合金元素形成的碳氮化物对晶界的钉扎作用，有效抑制晶粒的过度长大，提高热影响区的组织稳定性。提高钢的纯净度，减少杂质元素如硫、磷等的含量，能够显著降低这些杂质元素对热影响区性能的不利影响，进一步增强高强钢焊接热影响区的抗软化能力。

4.3 焊后处理工艺的改进

焊后处理工艺对于改善高强钢焊接热影响区的性能同样不可或缺。采用合适的回火处理，可以有效消除焊接残余应力。焊接残余应力的存在会对焊接接头的性能产生不利影响，可能导致裂纹的产生和扩展。通过回火处理，使焊接接头在一定温度下进行保温，促使组织发生转变，实现组织均匀化。组织均匀化能够使热影响区析出相重新调整分布，恢复部分强度与韧性。还可采用喷丸、超声冲击等表面强化处理方法。喷丸处理通过高速弹丸撞击焊接接头表面，使表面产生塑性变形，形成残余压应力层，提高表面硬度和疲劳强度。超声冲击处理则利用超声频的机械振动，使焊接接头表面层产生微观塑性变形，改善表层组织与性能，从而提高焊接接头的综合力学性能，有效缓解热影响区的软化问题。

5 工艺优化后的效果评估

5.1 微观组织分析

对实施工艺优化后的高强钢焊接接头进行微观组织分析是评估效果的重要手段。借助金相显微镜、扫描电镜等先进微观分析仪器，可以清晰观察热影响区微观组织形态。优化后，热影响区的晶粒得到明显细化，相较于优化前粗大的晶粒，细化后的晶粒组织更加均匀。晶粒细化能够增加晶界面积，晶界作为阻碍位错运动的重要结构，更多的晶界可以有效提高钢材的强度和韧性。强化相的析出状态也发生了显著变化，析出相变得更加弥散且稳定分布，这种均匀弥散的析出相能够更好地发挥强化作用，进一步提升焊接接头的性能。

参考文献:

- [1] 王东坡,张丁非,杜则裕等.焊接热过程对低合金高强钢焊接热影响区软化的影响[J].焊接学报,2020,41(11):87-92+130.
- [2] 雷正龙,王磊,王涛等.合金元素对高强钢焊接性能影响的研究进展[J].材料导报,2021,35(S2):3301-3306.
- [3] 张军,王恒,李鹏等.激光-电弧复合焊接高强钢工艺及接头性能研究[J].焊接学报,2022,43(08):115-121+131.
- [4] 刘黎明,王敏,邢丽等.焊后热处理对高强钢焊接接头组织与性能的影响[J].焊接学报,2021,42(06):94-99+131.
- [5] 陈俐,黄勇,王勇等.高强钢焊接热影响区软化机制及调控方法研究进展[J].机械工程材料,2023,47(01):1-8.

5.2 力学性能测试

力学性能测试结果直观反映了工艺优化对高强钢焊接接头性能的提升效果。通过拉伸试验、冲击试验等力学性能测试方法，对焊接接头的抗拉强度、屈服强度及韧性进行测定。测试结果显示，经过工艺优化后，焊接接头的抗拉强度和屈服强度均有显著提升，能够更好地满足工程实际应用中的承载要求。韧性也得到明显改善，冲击吸收功大幅提高，这意味着焊接接头在承受冲击载荷时，具有更好的抗断裂能力，降低了脆性断裂的风险。热影响区的软化程度明显减轻，其强度与母材的匹配性得到有效改善，使得整个焊接接头的力学性能更加均衡。

5.3 实际应用模拟测试

为了进一步验证工艺优化措施的有效性与其可行性，进行实际应用模拟测试。在模拟测试中，将优化工艺后的焊接结构件置于与实际工程相似的载荷条件下，观察其变形和承载能力。结果表明，这些焊接结构件在承受载荷时，表现出良好的变形协调性，能够均匀地分散应力，避免局部应力集中导致的过早失效。焊接结构件的抗断裂能力显著提高，在经历多次加载卸载循环后，依然能够保持良好的结构完整性。这一系列测试结果充分验证了所提出的工艺优化方案能够切实解决高强钢焊接热影响区软化问题，为高强钢在复杂工程环境下的安全可靠应用提供了坚实保障，具有重要的工程应用价值和推广意义。

6 结语

高强钢焊接热影响区软化问题通过工艺优化得到有效缓解。对软化机制的剖析及多因素影响研究为优化提供了理论基础。从焊接参数、母材成分到焊后处理的一系列优化措施，显著提升了焊接接头性能。未来，应持续探索更先进的焊接技术与材料设计方法，进一步完善工艺优化体系，以满足高强钢在高端制造领域对焊接质量日益严苛的要求，推动相关产业的高质量发展。