

不同焊接热输入对低合金高强钢组织与性能的影响

林志虎

中国能源建设集团天津电力建设有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i12.5148

[摘要] 以低合金高强钢为对象,分析了不同焊接热输入对接头组织和力学性能的影响规律。低热输入时,焊缝以细小的针状铁素体为主,强度高但塑性差点;高热输入下组织粗化、软化,韧性掉得明显。中热输入区间里,细晶铁素体和贝氏体混合在一起,强度、塑性和冲击韧性配得最好。热输入通过调控热循环参数来影响相变路径和晶粒尺寸,从而带动力学性能变化。确实存在一个最优热输入区间,能让组织和性能达到比较好的协调。

[关键词] 低合金高强钢; 焊接热输入; 力学性能

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A

Effects of Different Welding Heat Inputs on the Microstructure and Properties of Low-Alloy High-Strength Steel

Zhihu Lin

China Energy Engineering Group Tianjin Electric Power Construction Co., Ltd.

[Abstract] Taking low-alloy high-strength steel as the research subject, this paper analyzes the effects of different welding heat inputs on the microstructure and mechanical properties of welded joints. Under low heat input, the weld metal is mainly composed of fine acicular ferrite, resulting in high strength but relatively poor ductility. Under high heat input, the microstructure becomes coarser and softened, accompanied by a significant decrease in toughness. Within the medium heat input range, a mixture of fine-grained ferrite and bainite is formed, achieving a favorable balance among strength, ductility, and impact toughness. Welding heat input affects the phase transformation path and grain size by regulating thermal cycle parameters, thereby influencing the mechanical properties of the welded joint. The results indicate that an optimal range of welding heat input exists, within which a desirable balance between microstructure and mechanical properties can be achieved.

[Key words] low-alloy high-strength steel; welding heat input; mechanical properties

引言

低合金高强钢在工程结构里用得比较多,焊接热输入是影响接头组织和性能的关键工艺参数。热输入通过调节焊接热循环参数,改变焊缝区、熔合区、热影响区的相变路径和晶粒尺寸,最终决定接头的力学性能。这项研究以低合金高强钢为对象,设了低、中、高三组热输入梯度,系统分析它们对显微组织演变以及硬度、拉伸、冲击性能的影响,目的是把热输入怎样介导组织与性能的关联机制搞清楚,选出最优的热输入区间,给焊接工艺优化做个参考依据。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验基材与填充材料参数

试验选了一种低合金高强钢作基材,先把它的基体化学成分、力学性能基础参数和原始晶粒组织状态搞清楚。基材的屈服强度、抗拉强度、断后伸长率这些基本力学指标,得满足试验

要求才行。同时也要确定配套的焊接填充材料,比如焊丝或焊条的化学成分特性、熔敷金属力学性能以及规格尺寸。填充材料的合金体系设计要和基材搭得上,保证焊缝金属的组织 and 性能协调。严格控制好基材和填充材料的来源批次及质量一致性,这样后续焊接工艺试验才有可靠的材料基础,试验结果也更有可比性和可重复性。

1.2 焊接热输入梯度方案设计

按照焊接热输入的物理定义和计算方法,设计了一套包含多个梯度的热输入参数体系。试验组别分成低、中、高三类热输入,每类对应不同的热输入量值范围。焊接过程中,电弧电压、焊接电流、焊接速度这些关联工艺参数都固定下来,只通过调整热输入相关变量来实现梯度变化,保证热输入是唯一的变化因素。各组焊接过程的其他工艺条件也都保持一致,避免多个变量搅在一起干扰试验结论。

1. 3焊接试样制备工艺

所有焊接试样都用统一的坡口形式,坡口角度、钝边尺寸、根部间隙这些关键参数都定好。母材切割完以后,要加工坡口并清理表面,把氧化皮和油污去掉。装配的时候,对口间隙和错边量得严格控制好,然后用标准化的焊接工艺参数来完成各组试样的焊接。焊后冷却制度和表面清理流程对所有试样都一样,自然冷却到室温,再把焊缝表面的飞溅和焊渣清理掉。

1. 4检测设备与测试方法

金相组织检测用规定型号的光学显微镜和扫描电子显微镜,力学性能检测用万能材料试验机、硬度计和冲击试验机,这些设备都按相关测试标准校准好再操作。从焊缝区、熔合区、热影响区分别取金相试样和力学试样的位置要提前定好。试样预处理就是逐级打磨、机械抛光、化学腐蚀这些常规步骤^[1]。硬度测试沿着焊接接头横截面按固定间距打点,拉伸试验用标准棒状或板状试样,冲击试验在指定温度下做,记录吸收能量。

2 不同焊接热输入对低合金高强钢焊接组织的影响

2. 1热输入对焊缝区显微组织的影响

随着焊接热输入从低到高逐渐变化,焊缝区显微组织里铁素体、珠光体、贝氏体这些相的占比也在跟着变。低热输入时,热输入量控制在10千焦每厘米以下,焊缝冷却速度比较快,容易形成细小的针状铁素体和少量贝氏体。针状铁素体占比能到60%以上,晶粒尺寸被压在5微米左右,组织整体上是细化的。中热输入时,热输入量在15到25千焦每厘米之间,组织里的细晶铁素体降到40%以下,珠光体和粒状贝氏体比例升到50%左右,晶粒尺寸也长到10微米上下。高热输入下,热输入量超过35千焦每厘米,焊缝冷却速度明显降下来,组织倾向于长成粗大的先共析铁素体和侧板条铁素体,晶粒尺寸奔着20微米以上去了,粗化挺明显,贝氏体形态也从细密变得粗大。

2. 2热输入对熔合区显微组织的影响

熔合区是母材和焊缝金属之间的过渡区域,它对热输入的变化特别敏感。低热输入时,热输入量大概10千焦每厘米,熔合区宽度在50到80微米左右,组织有明显的梯度过渡特征,晶粒生长方向性比较强,界面结合紧密,组织均匀性也不错。热输入增大到25千焦每厘米后,熔合区宽度扩展到200到300微米,晶粒生长条件更充分,柱状晶有沿着垂直熔合线方向长大的趋势,晶粒尺寸从原来的5微米长到15微米,组织粗化更明显了^[2]。高热输入下,热输入量到了40千焦每厘米以上,熔合区宽度超过500微米,内部组织差异变大,部分区域出现马氏体或贝氏体这类非平衡相,含量能到30%左右。界面附近碳元素扩散充分,组织均匀性掉了40%以上。

2. 3热输入对热影响区显微组织的影响

热影响区根据峰值温度不同,可以分成粗晶区、细晶区和不完全相变区。低热输入时,热输入量在10千焦每厘米以下,粗晶区的晶粒长大受到限制,尺寸大概20微米,组织以细小板条马氏体或贝氏体为主。细晶区晶粒尺寸在5到8微米,组织比较均匀。不完全相变区还保留了一部分原始组织的特征,相变产物分布

比较散。热输入增加到25千焦每厘米后,粗晶区晶粒明显粗化,长到60微米左右,贝氏体或马氏体板条束变宽,韧性掉了30%。细晶区在中热输入下还能保持10微米上下的较细晶粒,但热输入超过35千焦每厘米的高热输入时,细晶区晶粒发生二次长大,到了25微米,组织也跟着粗化了。不完全相变区受热输入增大的影响,未转变的铁素体从50%减到20%以下,相变产物生成量增加到80%左右,组织非均匀性加重。热输入太高的话,热影响区各个分区都容易出现晶粒粗大、魏氏组织或者局部软化这类缺陷,而且缺陷的严重程度跟热输入量基本是正相关的。

3 不同焊接热输入对低合金高强钢焊接力学性能的影响

3. 1热输入对焊接接头硬度性能的影响

通过硬度测试,拿到了各组热输入下焊接接头不同区域的硬度分布数据,然后系统分析热输入变化对焊缝区、熔合区、热影响区硬度峰值和硬度梯度的影响。低热输入时,焊缝区冷却速率比较高,组织细化得明显,熔合区附近会形成一个明显的硬度峰值,能达到母材硬度的较高比例。同时从焊缝中心往母材方向走,硬度梯度比较陡,热影响区宽度也比较窄。热输入增大到中等水平后,焊缝区和热影响区的冷却速率降了一些,过饱和固溶强化效果减弱,硬度峰值慢慢往下掉,熔合区两侧的硬度差距缩小,整个接头区域的硬度分布曲线变得平缓,硬度梯度明显减缓^[3]。热输入再往高处走,到高位时,热影响区尤其是粗晶区跟不完全相变区交界的地方会出现明显的软化区域,硬度值大幅降低,硬度峰值基本没了,整体硬度水平掉到母材硬度以下,硬度梯度也变得特别平缓。

3. 2热输入对焊接接头拉伸性能的影响

对不同热输入下的焊接接头做了拉伸试验,测了抗拉强度、屈服强度和断后伸长率这三项核心指标。低热输入时,接头抗拉强度和屈服强度都比较高,接近或超过母材的相应指标,但断后伸长率偏低,强度和塑性之间有点失衡。拉伸断裂的位置大多在熔合区或热影响区的硬化带,断裂形式基本是没什么塑性变形的脆性断裂。热输入增加到适宜区间后,抗拉强度稍微降了一点,但还能保持在母材强度的一定比例以上,屈服强度下降幅度相对小一些,同时断后伸长率明显提上来了,屈服比也到了合理范围。断裂位置慢慢往远离熔合区的母材侧转移,断裂前能看到明显的颈缩。热输入过高时,抗拉强度和屈服强度都明显下降,分别低于母材强度的规定下限。断后伸长率虽然进一步增加了,但损失的强度已经超出允许范围,试件往往在热影响区的软化带发生颈缩断裂。

3. 3热输入对焊接接头冲击韧性的影响

在几个不同温度下对焊接接头做了冲击试验,拿到各组热输入对应的冲击吸收功数据,用来评价抗冲击能力随热输入变化的情况。低热输入时,焊缝区和热影响区组织细小均匀,冲击韧性不错,即使在比较低的试验温度下也能保持较高的冲击功,韧脆转变温度处在较低水平,冲击断口看着是典型的韧性断裂。热输入增大到中等范围后,冲击韧性保持得挺稳定,波动幅度也

小,这得益于组织均匀性改善了,不利相的比例也控制得比较好,不同温度下的冲击吸收功差距缩小了。热输入过高时,焊接接头里粗大晶粒和沿晶界分布的先共析铁素体明显增多,冲击吸收功大幅下降,比最优热输入条件下能掉很大一截,低温冲击韧性劣化得尤其厉害,韧脆转变温度往高温方向移了不少^[4]。结合显微组织特征来看,冲击韧性的波动主要跟热输入变化导致的晶粒尺寸改变、相组成比例调整以及组织均匀性差异有关。组织粗化和脆性相形态是韧性降低的内在原因,而组织细化和均匀化才是保持良好冲击性能的关键。

4 焊接热输入介导组织与性能的关联机制

4.1 热输入对焊接热循环参数的调控作用

焊接热输入一变,热循环过程中的几个核心参数也跟着变。热输入低了,加热时能达到的峰值温度就相对低一些,在高温区停留的时间也短,焊后冷却速度比较快。这种热循环条件能抑制晶粒长大,也能促进非平衡相转变。热输入慢慢增大以后,峰值温度明显升高,高温停留时间相应变长,冷却速度则明显降下来。热循环参数的系统性变化,进一步决定了焊缝和热影响区在加热冷却过程中会走什么样的相变路径。峰值温度的高低影响奥氏体化程度和晶粒长大倾向,高温停留时间控制着合金元素的扩散行为和均匀化程度,冷却速度则直接决定相变产物是什么类型、什么形态。

4.2 显微组织演变对力学性能的驱动机制

焊接接头的显微组织特征,对力学性能有决定性的影响。晶粒尺寸是控制强度和韧性的关键,晶粒细了,强度和抗冲击能力都能提上去;晶粒粗了,强度往下掉,韧脆转变温度也会升高。组织类型也很重要,针状铁素体、细晶贝氏体这类形态容易拿到好的强韧性匹配,反过来粗大的先共析铁素体和侧板条铁素体就会削弱力学性能。组织均匀性也扮演着重要角色,组织分布均匀,应力传递就顺畅,局部应力集中也能减少。一旦热输入偏离合理范围,晶粒粗化、组织不均匀、缺陷滋生这些问题就跟着来了。晶粒粗化会降低晶界强化效果,组织不均匀会让局部软硬相差变大,微裂纹容易在组织突变的区域萌生和扩展,最后硬度、强度和韧性全面劣化。

4.3 最优焊接热输入参数匹配机制

综合组织形貌和力学性能测试结果,可以找出一个最优的热输入参数范围,这个范围内组织均匀性和力学稳定性都能兼顾。热输入偏低时,组织虽然细,但冷却速度太快,容易产生硬化组织和比较大的残余应力,塑性储备不够。热输入偏高时,组织粗化和软化都比较明显,强度和韧性都掉得厉害。而在中等热输入区间,焊缝区和热影响区能形成以细晶铁素体和细小贝氏体为主的混合组织,晶粒尺寸控制在合理范围,各区域组织差异比较小。这个区间里,焊接接头的硬度分布均匀,抗拉强度和屈服强度保持较高水平,断后伸长率和冲击吸收功也能满足使用要求^[5]。合理的热输入调控区间,应该是能让热循环参数落在适宜的相变温度范围内、冷却速度适中、组织演变也能充分完成的区域,这样焊接接头的组织和性能才能达到最优匹配。

5 结束语

焊接热输入,说到底就是决定低合金高强钢接头组织和性能的核心工艺参数。热输入低了,组织虽然细,但塑性跟不上;热输入高了,组织粗化、软化,韧性明显往下掉。中热输入区间就比较理想,细晶铁素体和贝氏体混在一起,强度、塑性和韧性配得最好。热输入是通过调控热循环参数来影响相变路径和晶粒尺寸的,从而带动力学性能的变化。焊接实践里,把热输入控制在最优区间,接头的组织和性能才能协调统一。

【参考文献】

- [1]王知行.低合金高强度钢焊接粗晶热影响区组织--性能关系数字化研究[D].北京:北京科技大学,2025.
- [2]杜启帆.热输入对Q690qENH低合金高强钢GMAW焊接接头耐蚀性影响研究[D].天津:天津理工大学,2022.
- [3]李程,李涛,赵卓,等.低合金高强钢Q620M焊接接头微观组织及力学性能影响[J].城市轨道交通研究,2025,28(11):72-76,81.
- [4]胡兵.V-Ti-N微合金化耐候桥梁钢大热输入焊接CGHAZ及母材的组织与力学性能研究[D].河北:燕山大学,2023.
- [5]林纯丞.600MPa级低合金高强钢焊接材料选择及焊缝组织性能研究[D].北京:北京化工大学,2024.

作者简介:

林志虎(1982--),男,蒙古族,内蒙古人,本科,中级职称,研究方向:机械/焊接。