

15CrMo 钢多层堆焊过程中热影响区的组织演化行为及其对接头硬度的影响

冯琳杰¹, 吕品正², 赵永明³, 张巍¹, 刘福广², 葛军¹, 杨二娟², 米紫昊², 王艳松²

(1. 华能平凉发电有限责任公司, 甘肃 平凉 744000; 2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710032; 3. 中核核电运行管理有限公司, 浙江 杭州 310051)

摘要:采用同质焊条在 15CrMo 钢表面进行了不同层数的堆焊, 采用光学显微镜和显微硬度计对堆焊层显微组织和硬度分布进行了研究, 探讨了过热区高硬度魏氏组织的演化过程及其对接头硬度的影响。结果表明: 1 层堆焊后的热影响区形成了高于母材和焊缝硬度的高硬度区, 特别是过热区粗大的魏氏组织存在使热影响区硬度高于母材 200 HV; 在后续多层堆焊中过热区在持续的热输入下逐渐由粗大的魏氏组织转变为细小的等轴晶。当堆焊超过 5 层时, 魏氏组织向等轴晶的转变全部完成, 热影响区无明显的峰值硬度, 其与焊缝区硬度基本持平而与母材区的硬度之差缩小至 100 HV 以内, 整个焊接接头部位硬度小于 280 HV, 可为接头在免焊后热处理的塑性提供可靠保障。

关键词:多层焊接; 热影响区; 显微组织; 显微硬度

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20192716

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2021)11-0067-04

Microstructure Evolution of Heat Affected Zone of 15CrMo Steel during Multi-layer Welding and Its Influence on Hardness Distribution of Welded Joint

FENG Linjie¹, LYU Pinzheng², ZHAO Yongming³, ZHANG Wei¹, LIU Fuguang², GE Jun¹, YANG Erjuan², MI Zihao², WANG Yansong²

(1. Huaneng Pingliang Power Generation Co., Ltd., Pingliang 744000, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710032, China; 3. China Nuclear Power Operation Management Co., Ltd., Hangzhou 310051, China)

Abstract: Multi-layer bead welding was carried out on the surface of 15CrMo steel by using the homogeneous welding rod, and the microstructure and hardness distribution was investigated by optical microscope and Vickers hardness tester. The evolution process of Widmannstatten structure with high hardness in overheated zone and its influence on the hardness of the joint were discussed. The results show that, the high hardness zone whose hardness is higher than those of both base metal and weld zone forms in heat affected zone (HAZ) after welding one layer, and the harness of heat affected zone is 200 HV higher than that of base metal due to the existence of Widmannstatten structure in overheated zone. The coarse Widmannstatten structure in overheated zone transfers to fine equiaxed grains gradually in subsequent multilayer surfacing, and the transformation is complete when the welding layer is higher than 5. There is no peak hardness in HAZ, which is almost the same with that of the welding zone and higher than that of base metal within 100HV. The hardness of the welding joint is less than 280HV, and it can provide reliable guarantee for the plastic toughness of the joint without postweld heat treatment.

Key words: multilayer welding; heat affected zone; microstructure; microhardness

火电厂各类大规格或异型部件(如堵阀阀体、汽缸、集箱等)在长时间使用之后缺陷逐步显现。通常这些大规格部件运行过程中所承受的运行温度、压

力都较高, 此类部件缺陷的存在, 对机组的危害性极大, 因此对这些大规格部件要进行修复。目前关于此类大部件缺陷的现场修复工艺还不完善, 处理方法不当会对设备造成损伤, 并对机组的安全运行形成隐患。

按照现行标准, 我国火电厂耐热钢承压部件发现缺陷后的首选修复方法是采用同种钢材焊接结合焊后热处理, 其优势在于焊缝金属与基体成分差别

收稿日期: 2019-09-16

作者简介: 冯琳杰, 男, 河南郑州人, 高级工程师, 主要从事火力发电厂金属监督及焊接管理; 电话: 18700859812; E-mail: liufuguang@tpri.com.cn

小、力学性能相当、热膨胀系数匹配以及价格低廉等。然而,这类修复工艺必须进行焊后热处理,以降低接头残余应力、调节焊缝组织,进而提高焊缝强韧性。我国电力行业标准 DL/T869-2012、DL/T819-2010、DL/T752-1010 等标准都对不同类别、不同规格的耐热钢部件焊后热处理参数作了较为具体的规定。但是,对于火电厂某些大规格部件(如汽包、阀体、汽缸等),因壁厚大、直径大、形状不规则、结构复杂等原因,现场焊后热处理较难实现,且工艺控制困难(如部件变形量超标、局部组织过热或热处理温度不到位等),现场适用性受到限制。

近年来,采用奥氏体基体焊材的异种钢修复工艺在某些无法进行焊后热处理的部件上开始使用,所用焊材大多为 25%Cr-20%Ni 不锈钢焊材或 Ni 基焊材,其优势在于焊缝金属基体为奥氏体基体,不存在淬硬倾向、塑性高、不易开裂,可免进行焊后热处理。然而,由于焊缝金属与母材的化学成分和热膨胀系数差异较大,容易出现熔合区碳迁移、马氏体脆性层等缺陷,导致部件修复后出现早期开裂失效,对长

期运行的可靠性存在较大威胁。

综上所述,开发同种钢的免焊后热处理修复技术对于火电厂等不宜进行焊后热处理的大规格部件的现场修复意义重大。实际上,焊后热处理的主要目的是对焊接热影响区特别是过热区粗大的魏氏组织进行处理,以提高焊接接头的强韧性^[1]。因此,本文以 15CrMo 钢为例,研究多层焊接过程中后续焊接对首层焊接产生的热影响区显微组织与显微硬度的影响,为同种钢免焊后热处理工艺开发提供必要的理论和实验基础。

1 实验材料与方法

实验用母材为国内某钢厂提供的 15CrMo 钢,尺寸为 400mm×150mm×20mm,焊材选用 R307 焊条,焊条的直径为 3.2mm。母材和 R307 焊条的主要化学成分见表 1。

首先对母材钢板用砂轮进行打磨,再用丙酮清洗油污,使其表面出现金属光泽。然后,采用手工电弧焊对 15CrMo 钢进行堆焊,模拟实际现场焊接修复过

表 1 实验用 15CrMo 钢和 R307 焊条的主要化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Main chemical composition of 15CrMo steel and R307 electrode for test (wt%)

材料	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	S	P
15CrMo	0.12~0.18	0.40~0.70	0.17~0.37	0.80~1.10	0.40~0.55	≤0.30	≤0.035	≤0.035
R307	≤0.12	0.8	0.3	-	0.5	-	≤0.035	≤0.035

程,工艺参数如表 2 所示。在钢板表面沿长度方向均匀堆焊 7 道焊缝,间距为 50mm,每道焊缝长度为 150mm。从左至右每道焊缝的层数依次从 1 层递增到 7 层,每层堆焊结束后采用空气锤去应力并用砂轮打磨去除一半,随后再堆焊另外一层,以此类推。

表 2 实际焊接工艺参数

Tab.2 Welding process parameters

焊接速度 (mm·min ⁻¹)	电流 /A	电压 /V	堆焊层数	预热温度 /°C
80	120	83	7	100~150

采用线切割将每道焊缝从钢板中取出,并在中部切出长度为 10mm 的小块,沿垂直于焊接平面方向按照金相制样方法进行打磨和抛光,再用 4%硝酸酒精溶液进行腐蚀,利用体式显微镜观察样品的宏观形貌并测量热影响区的宽度,使用 TM17-3M200 金相显微镜进行显微组织观察;采用 HV-120 型显微维氏硬度机分析从母材到焊缝的硬

度变化,沿焊缝中心线由母材向焊缝每隔 0.5mm 打一个点,载荷为 1kg,保压时间为 30s。

2 实验结果与讨论

2.1 堆焊层宏观形貌

为了展示堆焊层的形貌,选取了具有代表性的 1、3、5 和 7 层堆焊层横截面的宏观形貌,如图 1 所示。从图中可以看出,经过腐蚀后堆焊层能明显地区分出母材区、热影响区和堆焊区,各区域边界清楚。同时,接头部分未出现气孔、夹杂以及焊瘤的情况,焊缝边缘熔合良好,成形整齐,也表明了本文所选取的焊材和焊接工艺恰当。从图中还可以看出,第一层堆焊后堆焊层为垂直于熔合线生长的粗大柱状晶,这主要是受焊接过程的散热形式控制。多层次焊接后,后焊层对先焊层有更进一步的热量输入,导致先焊层形貌发生变化,粗大柱状晶特征消失。用体式显微镜对 HAZ 的宽度进行测量,得出焊接层数的增加

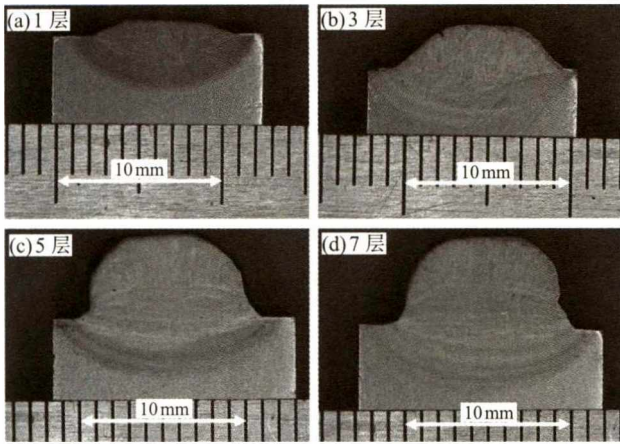


图1 不同层数堆焊层横截面的宏观形貌
Fig.1 Macroscopic morphology of cross section of surfacing layer with different layers

对 HAZ 的宽度没有明显的影响, 均为 1.80 mm 左右, 但是腐蚀后的热影响区形貌似乎发生了很大的变化, 这主要归因于多层焊接时后焊层对第一层形成的 HAZ 区域不断的热输入, 起到了焊后热处理的效果^[2]。

2.2 单层堆焊层的显微组织与硬度分布

图 2 为单层堆焊层试样从母材区到焊缝区显微硬度的分布曲线及其典型区域的显微组织。从图 2 中可以看出, 从母材到焊缝区硬度呈现先上升后降低的趋势, 其中硬度高于母材和焊缝的宽度约为 2.5 mm, 与图 1 所测量的 HAZ 区宽度相当。这也符合大部分焊接接头的硬度分布规律, 热影响区的硬度大于焊缝和母材, 硬度最高值约为 400 HV, 较焊缝和母材区高了 100 HV 和 200 HV, 也远超过 15CrMo 钢焊接接头硬度低于 300 HV 的要求, 这种情况下焊接接头一般会表现出严重的脆性。对比分析不同区域的显微组织可以看出, 母材区为由铁素体和珠

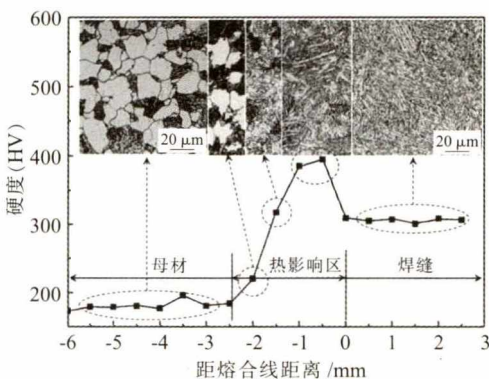


图2 单层堆焊层从母材到焊缝的硬度分布及其对应的显微组织

Fig.2 Hardness distribution of single surfacing layer from base metal to weld and its corresponding microstructure

光体组成的典型低碳钢显微组织, HAZ 区域从母材侧到焊缝区可划分为典型的部分相变区、正火细晶区和由粗大魏氏组织构成的过热区, 而焊缝区域则为水平方向生长(垂直于焊缝)的树枝晶结构。从硬度分布和显微组织观察结构不难看出, 采用传统的无焊后热处理工艺的接头脆性主要可归结于过热区高硬度的粗大魏氏组织。为此, 将主要考察过热区在后续多层堆焊过程中显微组织的演化和最终硬度的分布情况, 为焊后免热处理工艺的探索提供基础^[3-4]。

2.3 过热区的组织演化

从图 2 所示的堆焊层硬度分布及对应的显微组织不难看出, 影响焊接接头脆性的关键区域为紧挨熔合线靠近母材的区域或是从硬度高于母材的区域向焊缝偏移 2.5 mm 左右的过热区。借助这两个特征, 很容易找到焊接不同层数后过热区显微组织的变化, 如图 3 所示。从图 3(a)可以看出, 1 层堆焊的过热区为典型的魏氏组织, 主要原因是高的热输入下奥氏体晶粒长大, 而后先析出的铁素体或渗碳体从奥氏体晶界上向晶内生长, 故在粗大的原奥氏体晶粒内部形成了平行状的针状析出物。2 层堆焊后过热区的显微组织与 1 层堆焊基本相同, 继续到 3 层后过热区的显微组织才发生了一定程度的变化, 主要体现为部分区域粗大的奥氏体晶粒转变为细小等轴晶, 如图 3(b)所示。5 层堆焊后看不到魏氏组织, 全部转变为等轴晶, 7 层堆焊后仍呈现等轴晶结构, 但晶粒尺寸略有增大, 主要是由于持续的热输入导致晶粒长大。

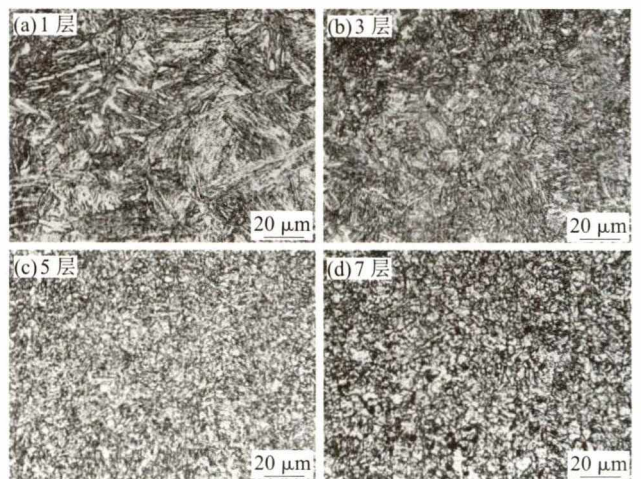


图3 不同层数堆焊后焊接热影响区过热区的显微组织
Fig.3 Microstructure of the superheated zone in the heat affected zone after welding different layers

2.4 多层堆焊层的硬度分布

图4是多层堆焊焊接接头的硬度分布曲线。从图中可看出,当堆焊层数少于4层时,从母材区到焊缝区的硬度变化规律几乎一致,焊接热影响区的硬度明显高于母材区和焊缝区。总体来讲,随着堆焊层数的增加,HAZ区特别是过热区对应的峰值硬度有一定程度的降低,这与图3(b)所对应的显微组织结果是一致的,是由于过热区魏氏组织部分转变为等轴晶造成的。当堆焊层数增加至5层以上时,硬度分布曲线与4层以下堆焊时完全不同,尽管HAZ区的硬度仍明显高于母材,但差值已从200HV降低至小于100HV。HAZ区的过热区硬度峰值消失,整个HAZ区的硬度几乎与焊缝相同,这与图3(c)和3(d)所示的显微组织结果完全吻合,表明在多次热输入的情况下魏氏组织能够完全转变为细小的等轴晶,达到了焊后正火处理的效果^[5]。整个焊接接头的硬度小于300HV,且母材与焊缝区和HAZ的硬度

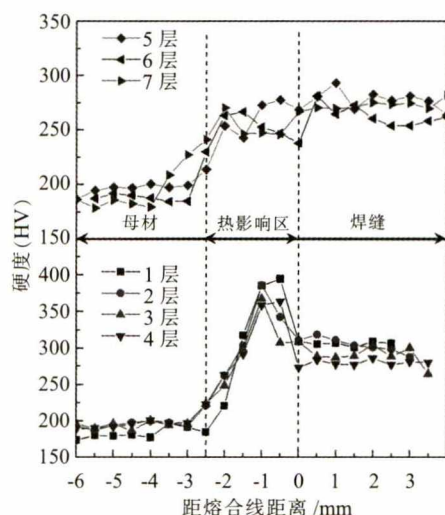


图4 不同层数堆焊接头从母材到焊缝的硬度分布
Fig.4 Hardness distribution of the welded joint of different layers from the base metal to the weld


差值小于100HV,能满足工程上对焊接接头硬度的要求^[6-7]。

3 结论

(1) 15CrMo 钢堆焊层的母材区为等轴状铁素体和珠光体,焊缝区为垂直于焊缝生长的树枝晶结构,热影响区分为典型的部分相变区、正火区和过热区。1层堆焊后热影响区的硬度明显高于母材区和焊缝区,过热区的最大峰值硬度比母材区高200HV。

(2) 多次堆焊后热影响区的宽度几乎未发生变化,堆焊层数少于4层时从母材侧到焊缝的硬度分布规律基本相同,但由于过热区的魏氏组织部分转变为细小等轴晶,热影响区的峰值硬度略有降低。堆焊层数多于5层时,过热区魏氏组织完全转变为细小等轴晶,热影响区不存在峰值硬度且与焊缝区硬度基本一致,其与母材的硬度差值小于100HV。

参考文献:

- [1] 安丽君,张志坚. 对焊接接头热影响区维氏硬度试验的探讨[J]. 理化检验(物理分册), 2002(2): 53-55.
- [2] 彭云,何长红,田志凌,等. 超细晶粒低碳钢焊接工艺适应性研究[C]// 七省区市机械工程学会科技论坛. 2005.
- [3] 李继红,杨亮,张敏. X100 管线钢焊接接头的显微组织和性能[J]. 机械工程材料, 2014, 38(2): 59-62.
- [4] 张敏,任晓龙,杨亮,等. 低碳贝氏体钢双面埋弧焊接接头组织及硬度分析[J]. 热加工工艺, 2015, 44(1): 187-189.
- [5] 王心红,张志毅. 多次补焊对转向架构架焊接接头机械性能的影响[J]. 机车车辆工艺, 2011(4): 19-20.
- [6] 刘靖,鹿守理. 低碳钢组织与力学性能关系[J]. 工程科学学报, 2002, 24(2): 208-210.
- [7] 曹永胜. 奥氏体不锈钢与低碳钢异种钢焊接接头性能研究[J]. 丝路视野, 2016(23): 151-152. 

欢迎订阅 欢迎赐稿 欢迎刊登广告