

在役 15Cr1Mo1V 钢管道焊接接头显微组织与力学性能研究

王艳松¹, 刘福广¹, 米紫昊¹, 韩天鹏¹, 张 磊², 杨二娟¹, 巴特尔²

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 华能伊敏煤电有限责任公司伊敏电厂, 内蒙古 呼伦贝尔 021130)

摘 要:以某电厂运行约 13 万 h 的 15Cr1Mo1V 钢高温再热蒸汽管道焊接接头作为研究对象, 对其显微组织、硬度、拉伸、冲击和失效位置进行了研究分析。结果表明, 服役管道焊接接头各区域均有多边形铁素体和析出物, 组织出现一定的老化现象。焊接接头各区域硬度差异明显, 焊缝中呈现多层多道焊典型的回火效应, 盖面焊缝处硬度值普遍较高。焊接接头各区域拉伸和冲击结果均表明室温和高温下焊缝的强度均优于母材, 但塑性和韧性均相对较差, 特别是高温环境下焊缝的塑性和韧性下降较多; 焊接接头拉伸和冲击断口显示母材断口中的韧窝数量多且韧窝较深, 而焊缝中由于第二相的析出, 尽管拉伸强度有所提高, 但其均明显降低。

关键词: 15Cr1Mo1V 钢; 高温再热蒸汽管道; 焊接接头; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TF76, TG441.7

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)02-0198-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.02.028

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on microstructure and mechanical properties of welded joints of 15Cr1Mo1V steel pipeline in service

Wang Yansong¹, Liu Fuguang¹, Mi Zihao¹, Han Tianpeng¹, Zhang Lei², Yang Erjuan¹, Ba Teer²

(1. Xi'an Thermal Engineering Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Yimin Power Plant of Huaneng Yimin Coal Power Co., Ltd., Hulunbuir 021130, Inner Mongolia, China)

Abstract: The microstructure, hardness, tensile strength, impact and failure position of the welded joint of 15Cr1Mo1V steel for high temperature reheat steam pipeline, which has been operated for about 130 000 hours in a power plant, were studied and analyzed. The results show that there are the polygonal ferrite and precipitates in each micro zones of the pipeline joint in service, and the microstructure appears the certain aging phenomenon. The hardness of each micro zones of the joint is obviously different, and the typical tempering effect of multi-layer and multi pass welding appears in the weld, and the hardness of the cover weld is generally high. The tensile and impact results of each micro zones of the welded joint show that the strengths of the weld at room temperature and elevated temperature are better than those of the base metal, but the plasticity and toughness are relatively poor, especially at elevated temperature, the plasticity and toughness of the weld decrease more. The tensile and impact fracture surfaces of the welded joint show that there are many dimples and deep dimples in the fracture surface of the base metal. However, due to the precipitation of the second phase in the weld, although the tensile strength is improved, its plasticity and toughness significantly declined.

Key words: 15Cr1Mo1V steel, high temperature reheat steam pipeline, welded joint, microstructure, mechanical property

收稿日期: 2022-12-10

基金项目: 中国华能集团科技项目 (HNKJ20-H47, TN-20-TYK09)。

作者简介: 王艳松, 1991 年出生, 男, 河南开封人, 硕士, 工程师, 主要从事电站耐热钢部件焊接修复技术研究, E-mail: wangyansong@tpri.com.cn。

0 引言

15Cr1Mo1V 钢是我国 20 世纪末期从俄罗斯引进的 300 MW 及其以上机组高温再热蒸汽管道用钢^[1]。目前该类机组已累计运行约 13 万 h, 虽然该类机组服役年限已较长, 但其仍承担着为当地工业化建设发电的任务, 且在未来一段时间内仍将继续服役运行^[2-3], 如何保证该类机组的安全可靠运行是当前学术研究与工业界普遍关注的重点。

焊接技术作为工业生产中一种重要的连接方法被广泛地应用于电厂管道建设中, 通常因焊接接头各区域化学成分与显微组织的差异, 导致焊接接头各区域性能存在着差异, 焊接接头部位成为整个结构的薄弱位置^[4-6]。而 15Cr1Mo1V 钢长期使用后容易发生组织老化及性能劣化等问题, 将严重威胁火电厂机组的安全可靠运行^[7-9], 特别是焊接接头部位各区域在服役过程中性能劣化的程度不一, 发生失效的风险较大, 危害较强。然而截至目前, 关于国内在役的 15Cr1Mo1V 钢主蒸汽管道焊接接头组织与性能的研究鲜有报道, 且当前的接头性能是否满足发电机组的安全运行尚缺乏研究数据的支撑。

笔者针对已运行 1.3×10^5 h 15Cr1Mo1V 钢高温再热蒸汽管道焊接接头, 系统地开展接头显微组织、硬度分布、拉伸性能与冲击性能研究, 并基于 Smith 理论分析焊接接头优先失效位置与失效原因, 所得结论对于保障发电厂高温再热蒸汽管道的安全运行具有重要的现实意义。

1 试验方法

试验材料选用某电厂运行约 1.3×10^5 h 的高温再热蒸汽管道, 材质为 15Cr1Mo1V 钢, 焊缝焊条为 R317, 取样包括管道整个焊接接头。依据《GB/T 223 钢铁及合金化学分析方法》测量母材及焊缝的化学成分, 结果如表 1 所示。采用线切割在焊接接头截取金相试样, 并置于丙酮溶液中进行超声波清洗, 吹干后在冷镶模具中镶嵌, 静置 30 min 后取出, 依次采用 240[#]、500[#]、800[#]、1 200[#]、1 500[#]和 2000[#]砂纸打磨, 经抛光和腐蚀处理后用酒精冲洗吹干, 采用 EVO-MA25 型扫描电镜进行显微组织观察。依据《GB/T 2654-2008 焊接接头硬度试验方法》采用德国 KB30S-FA 显微硬度计进行焊接接头硬度测量, 依据《GB/T 228.1-2010 金属材料拉伸试验第 1

部分室温试验方法》采用 ETM105D 微机控制电子万能试验机进行接头室温拉伸试验, 依据《GB/T 229-2020 金属材料夏比摆锤冲击试验方法》采用 PIT452D-2 双立柱金属摆锤冲击试验机进行焊缝和热影响区的室温冲击试验。

表 1 母材及焊缝的化学成分

Table 1 Chemical compositions of base metal and welds %

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
母材	0.11	0.21	0.65	0.011	0.010	1.11	0.91	0.20
焊缝	0.088	0.25	0.71	0.014	0.010	1.13	0.56	0.21

2 结果与讨论

2.1 焊接接头宏观金相与显微组织

焊接接头宏观形貌如图 1 所示, 由图 1 可知, 焊缝宽度约为 28 mm, 热影响区宽度约为 3 mm。沿焊接接头的中心线对母材、不完全结晶区、细晶区 (FGHAZ)、粗晶区 (CGHAZ) 和焊缝五个区域的显微组织进行观察, 结果如图 2 所示。

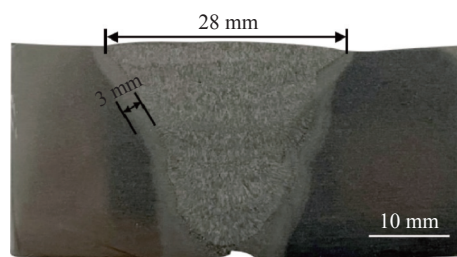


图 1 焊接接头宏观形貌

Fig. 1 Macro morphology of welded joint

15Cr1Mo1V 母材的显微组织为多边形铁素体和粒状贝氏体(图 2(a)), 不完全相变区和细晶区也为多边形铁素体和粒状贝氏体(图 2(b)和 2(c)), 与不完全相变区相比, 细晶区的晶粒较小。粗晶区为粗大的板条贝氏体及粒状贝氏体, 晶内及晶界处颗粒状析出物呈链状分布(图 2(d)), 焊缝为贝氏体, 晶内及晶界处存在颗粒状析出物, 柱状晶晶粒之间存在先共析铁素体(图 2(e)), 这与高 Cr 耐热钢经热处理后的组织特征相似^[10-13]。进一步对焊缝和母材室温组织进行 EDS 分析, 结果如图 3 和 4 所示, 可以看出母材晶界处 Fe、C 含量降低, Mo 含量明显提高, 晶内 Cr 含量波动较大, 说明在长期时效过程中 Mo 向晶界偏析, 晶内析出大量含 Cr 的碳化物。而焊缝中晶界处 Fe 含量降低, C、Cr 和 Mo 含量明显提高, 晶界处析出大量含 Cr 和 Mo 的碳化物。

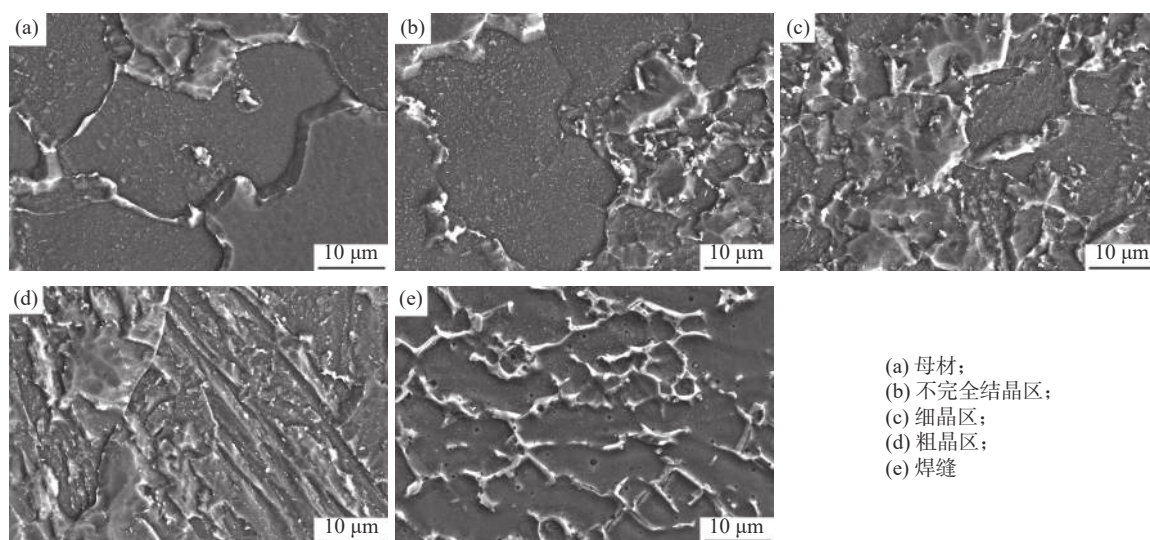


图 2 焊接接头各微区显微组织形貌
Fig. 2 Microstructure of each micro zone of welded joint

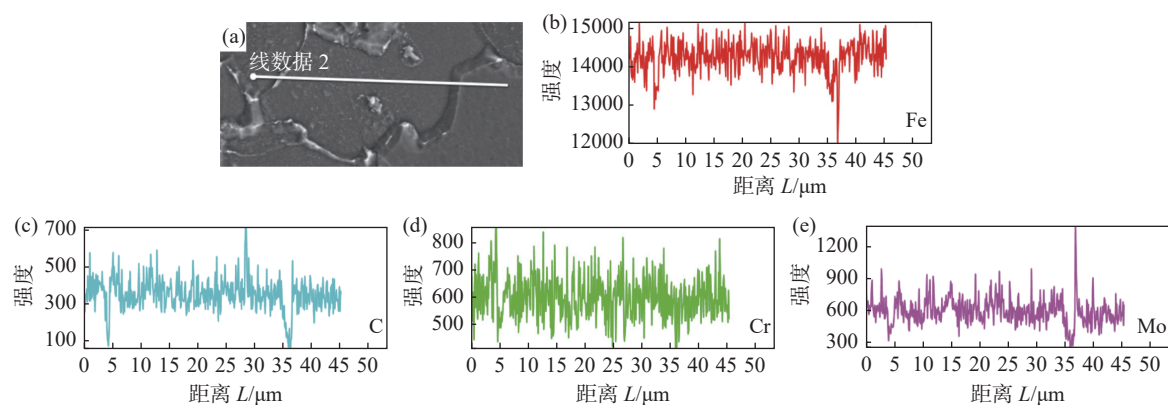


图 3 母材位置 EDS 线扫描结果
Fig. 3 EDS line scanning results of base metal position

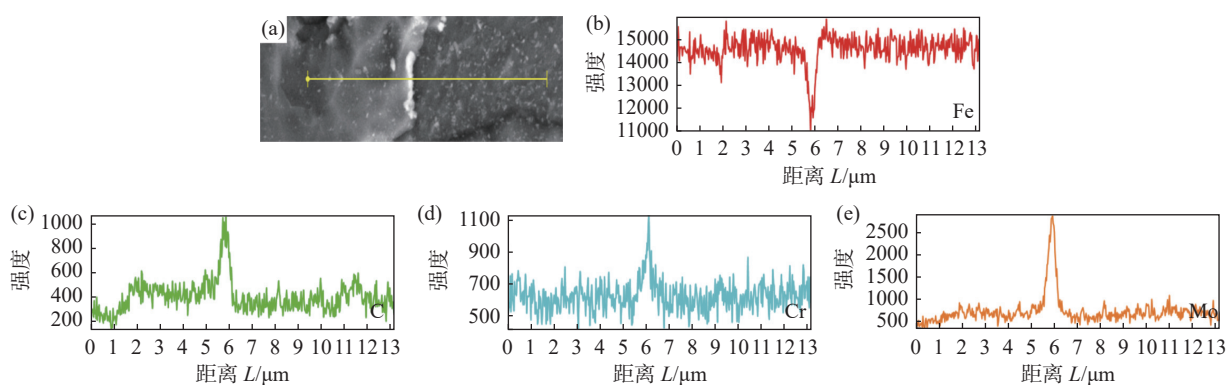
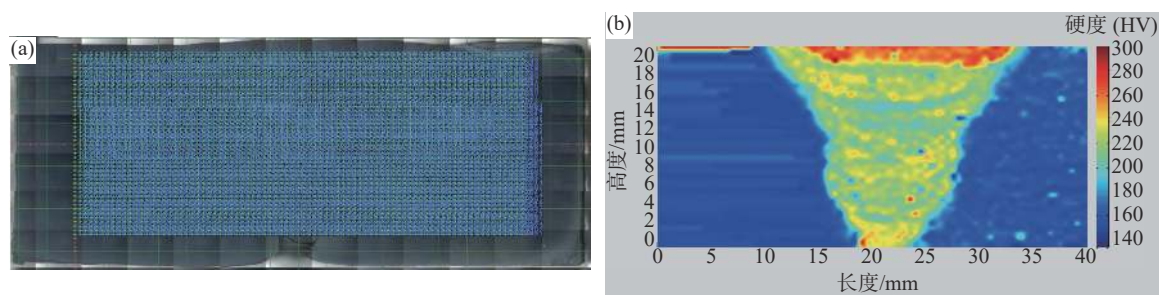


图 4 焊缝位置 EDS 线扫描结果
Fig. 4 EDS line scanning results of weld position

2.2 焊接接头硬度分布

焊接接头硬度测量点的分布如图 5(a) 所示, 接头硬度分布规律如图 5(b) 所示, 可以看出多层多道焊存在明显的回火效应, 焊缝中的硬度分布呈现典

型的层道状; 焊缝外表面因为冷却快, 无回火效应, 因此硬度明显较高; 母材硬度较低, 焊接热影响区的硬度高于母材, 低于焊缝。



(a) 焊接接头硬度测量点分布; (b) 焊接接头硬度值分布

图 5 焊接接头硬度分布

Fig. 5 Hardness distribution of welded joints

2.3 焊接接头拉伸性能

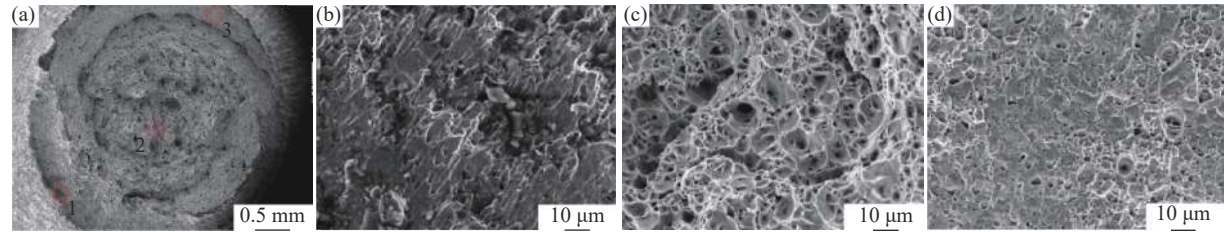
从 15Cr1Mo1V 焊接接头的母材和焊缝中分别取拉伸试样进行室温拉伸和 540 ℃ 的高温拉伸, 其结果如表 2 所示, 可以看出, 在室温下由于焊缝中有强化相的析出, 焊缝的屈服强度 (500 MPa) 高于母材 (263 MPa), 而进入塑性阶段后, 焊缝中的强化相加速了材料的开裂, 使得焊缝的抗拉强度 (600 MPa) 高于母材 (502 MPa), 焊缝的断后伸长率 (26%) 小于母材 (30%), 焊缝的断面收缩率 (72%) 小于母材 (77%); 在高温下尽管母材组织相对均匀, 但焊缝的屈服强度 (456 MPa) 和抗拉强度 (465 MPa) 均高于母材, 而焊缝的断后伸长率 (5%) 和断面收缩率 (10%) 均显著低于母材, 这充分说明了在高温的作用下, 焊缝组织中会持续产生强化相, 这些强化相能有效提高焊缝金属的强度, 但强化相周围的微裂纹一旦产生, 在外加载荷的作用下, 这些微裂纹将聚集长大, 焊缝金属将快速断裂失效。总体来看, 无论是室温还是高温环境下, 焊缝金属的强度均显著高于母材, 而焊缝金属的塑性低于母材, 特别是高温环境下焊缝金属塑性减少的更多。

图 6 为高温 540 ℃ 母材拉伸断口形貌, 从宏观断口中可以看出从内向外依次为纤维源区和剪切唇区, 放射区消失, 在宏观断口形貌中看不到剪切脊, 剪切唇区出现向上的杯锥状断口。图 6 位置 1 为高温 540 ℃ 母材拉伸断口的剪切唇区, 受高温环境的作用, 该区域组织中出現较多的颗粒状析出相, 图 6

位置 2 为高温 540 ℃ 母材纤维区形貌, 可以看出韧窝尺寸相差不大、深度大且分布均匀, 图 6 位置 3 为高温 540 ℃ 母材拉伸断口的剪切唇区, 该区存在数量少且较浅的韧窝。图 7 为高温 540 ℃ 焊缝拉伸断口形貌, 断口从内向外依次为纤维源区、剪切唇区。剪切唇区出现向上的杯锥状断口与向下杯锥状断口交汇的特征。图 7 位置 1 为高温 540 ℃ 焊缝拉伸断口形貌的剪切唇区, 该区表面不平整, 存在大量韧窝, 且弥散分布的个别韧窝较深, 韧窝中有颗粒状析出物。图 7 位置 2 为高温 540 ℃ 焊缝拉伸断口形貌的纤维区, 图中可以看出该区韧窝数量较为密集但深度浅, 韧窝中有小颗粒的析出物。图 7 位置 3 为高温 540 ℃ 焊缝拉伸断口形貌的剪切唇区, 表面较为平直, 韧窝数量少且较浅。从母材及焊缝高温下拉伸断口可以看出, 母材韧窝相较于焊缝大而深, 具有良好的塑性; 焊缝断口韧窝数量多但韧窝较浅, 韧窝中大量的析出相提高了焊缝的强度, 这与拉伸试验结果一致。

表 2 母材、焊缝室温与高温拉伸结果
Table 2 Tensile results of base metal and weld at room temperature and high temperature

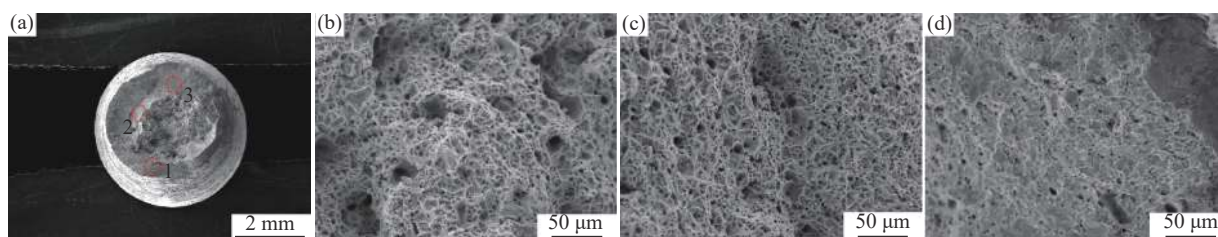
测试温度	材料	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长率 A /%	断面收缩率 Z /%
室温	母材	502	263	30	77
	焊缝	600	500	26	72
高温	母材	274	204	39	88
	焊缝	465	456	5	10



(a) 宏观形貌; (b) 位置 1 的形貌; (c) 位置 2 的形貌; (d) 位置 3 的形貌

图 6 540 ℃ 母材拉伸断口形貌

Fig. 6 Tensile fracture morphology of base metal at 540 ℃



(a)宏观形貌; (b)位置 1 的形貌; (c)位置 2 的形貌; (d)位置 3 的形貌

图 7 540 °C 焊缝拉伸断口形貌

Fig. 7 Tensile fracture morphology of welds at 540 °C

2.4 焊接接头冲击

在 15Cr1Mo1V 钢焊接接头上取冲击试样, 缺口位置分别位于母材、热影响区和焊缝区, 三个区的冲击吸收功分别为 191、186 J 和 22 J。对冲断试样的断口按照图 8 所示的位置进行观察, 结果分别如图 9、10 和图 11 所示。

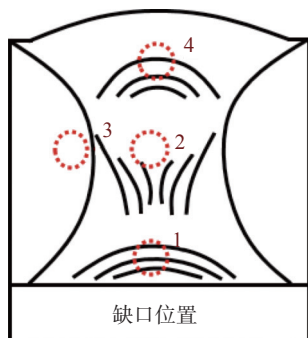
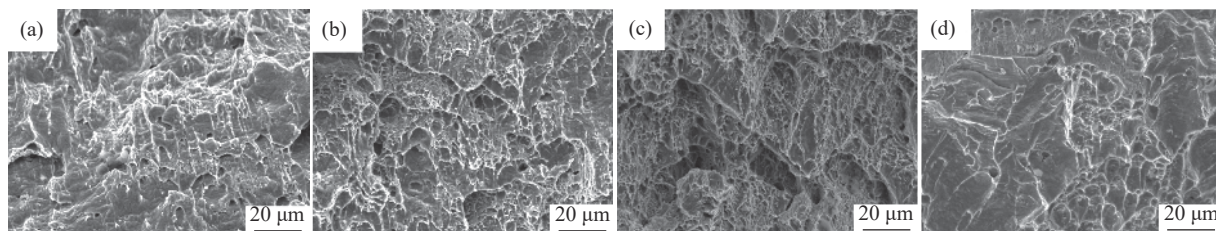


图 8 冲击断口形貌观察位置示意

Fig. 8 Schematic diagram of observation position of impact fracture morphology

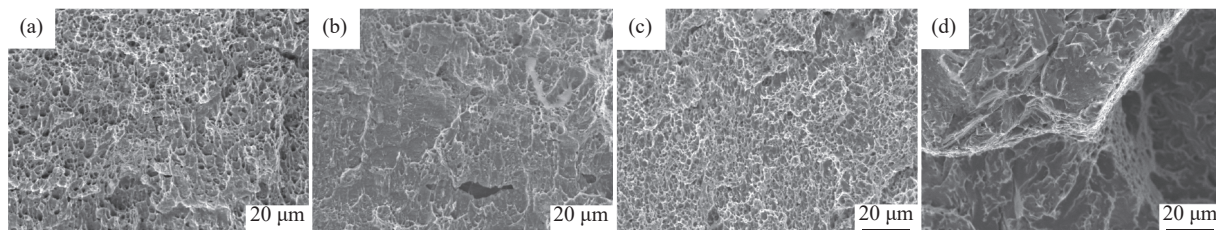
从图 8 ~ 11 可以看出, 母材冲击断口 1 和 4 位置为韧性断裂和脆性断裂混合区域, 2 和 3 位置为典型的韧性断裂, 且韧窝较深, 韧窝数量较多。热影响区冲击断口 2 和 4 位置为韧性断裂和脆性断裂混合区域, 脆性断裂的小平面明显增多, 1 和 3 位置为韧性断裂。焊缝冲击断口 1、2 和 4 位置为韧性断裂和脆性断裂混合区域, 特别是 1 和 2 位置, 脆性断裂特征明显, 3 位置为韧性断裂, 韧窝小且浅。从母材、热影响区和焊缝区冲击断口形貌可看出, 母材和热影响区的断裂形式为韧性断裂和脆性断裂混合, 以韧性断裂为主; 焊缝区的断裂形式为韧性断裂和脆性断裂混合, 以脆性断裂为主。此外, 从焊缝的冲击断口形貌(图 11)可以看出, 断口表面分布着较多大小不等、形状不一的第二相(图中圆形虚线所示位置), 这些第二相导致裂纹形核的作用逐渐加大。



(a) 位置 1; (b) 位置 2; (c) 位置 3; (d) 位置 4

图 9 母材冲击断口形貌

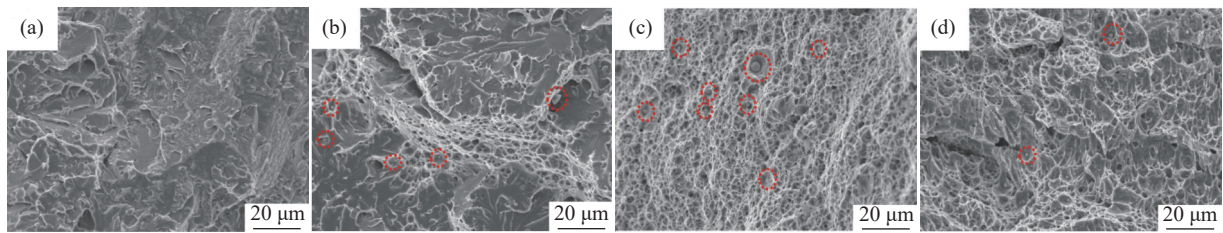
Fig. 9 Impact fracture morphology of base metal



(a) 位置 1; (b) 位置 2; (c) 位置 3; (d) 位置 4

图 10 热影响区冲击断口形貌

Fig. 10 Impact fracture morphology of heat affected zone

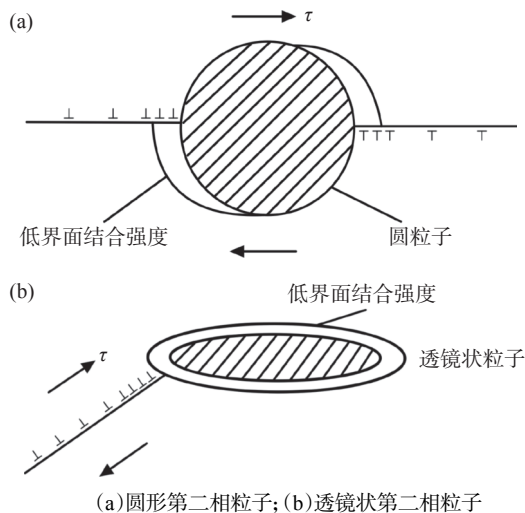


(a) 位置 1; (b) 位置 2; (c) 位置 3; (d) 位置 4

图 11 焊缝区冲击断口形貌

Fig. 11 Impact fracture morphology of weld zone

图 12 为不同形状第二相位错塞积群的作用下界面分离的特点,可以看出,图 12(a)中第二相周围相当于一个微孔洞,在冲击载荷作用下,微孔洞周围瞬间形成裂纹并扩展;图 12(b)中第二相自身等效于一个微裂纹,在冲击载荷作用下,该微裂纹周围基体瞬间开裂并扩展失效。由此可见,在长期高温环境下服役时焊缝金属中容易产生第二相析出物,随着这些析出物的不断聚集长大,焊缝金属的冲击韧性会大大减小,极大地增加了焊缝金属脆性失效的风险。此外,根据焊缝金属组织的 SEM 和 EDS 结果,发现在晶粒边界上出现了 Cr 和 Mo 的碳化物(如图 4 所示),根据 Smith 理论,当晶界上有非金属第二相时,如果形变又受阻于第二相,则很容易导致此脆性相中裂纹的成核,使晶界碳化物开裂,裂纹在外力的作用下扩展到邻近铁素体晶粒,最后导致解理断裂。



(a) 圆形第二相粒子; (b) 透镜状第二相粒子

图 12 不同形状第二相位错塞积群作用下的界面分离^[10]Fig. 12 Interface separation under the action of second phase staggered product groups with different shapes^[10]

参考文献

- [1] Chen Zhongbing, Zhang Lijun, Liang Jun, *et al.* Early failure analysis and prevention of in-service 15X1M1Ø steel welded joints[J]. Heat TreatmEnt of Metals, 2012, 37(11): 119-124.
(陈忠兵, 张立君, 梁军, 等. 在役 15X1M1Ø 钢焊接接头早期失效分析及其预防[J]. 金属热处理, 2012, 37(11): 119-124.)
- [2] Ju Guangyu, Lü Yu, Liu Wensheng, *et al.* Microstructure and properties of main steam pipe and R317 weld of 1.2x105h

根据 Smith 理论和 Cottrell 模型的推导^[10],由能量平衡条件求得裂纹失稳扩展的临界应力,即断裂应力如式(1)所示。

$$\sigma_f = \left[\frac{8G\gamma_p}{\pi(1-\nu)C_0} \right]^{1/2} \quad (1)$$

由公式(1)可以看出,裂纹失稳扩展的临界应力与晶界碳化物厚度成反比关系,碳化物厚度越厚,裂纹失稳扩展的临界应力越大。

由以上 15Cr1Mo1V 钢焊接接头的组织与力学性能研究结果可见,高温服役环境会加速焊缝中碳化物的析出,焊缝强度提高,而塑韧性变差。在电厂生产过程中,针对已服役 10 万小时以上的 15Cr1Mo1V 钢焊接接头,建议在不影响生产的前提下将现行 540 ℃ 的服役温度降低 20 ~ 30 ℃,以延长接头使用寿命。

3 结论

通过对火电厂运行约 1.3×10^5 h 15Cr1Mo1V 管道焊接接头显微组织与力学性能进行研究,得到如下结论:

1) 15Cr1Mo1V 钢焊接接头各区域显微组织差异较大,母材晶粒内析出大量含 Cr 的碳化物,晶界上析出含 Mo 的化合物,而焊缝晶界处析出了大量含 Cr 和 Mo 的碳化物。

2) 15Cr1Mo1V 钢焊接接头硬度分布差异明显,焊缝中呈现多层多道焊典型的回火效应,盖面焊缝由于无回火作用,硬度值普遍较高。

3) 15Cr1Mo1V 钢焊接接头拉伸和冲击结果均表明室温和高温下焊缝的强度优于母材,但韧性不如母材,从焊接接头的母材到焊缝位置,材料的韧性逐渐降低。

- 15Cr1Mo1V steel[J]. *Metal Heat Treatment*, 2019, 44(6): 29–32.
(句光宇, 吕煜, 刘文生, 等. 运行 1.2x105h15Cr1Mo1V 钢主蒸汽管及R317 焊缝的组织 and 性能[J]. *金属热处理*, 2019, 44(6): 29–32.)
- [3] Yang Xirui, Zou Jianxin, Song Li, *et al.* Microstructure and mechanical properties of 15Cr1Mo1V steel under long-term aging[J]. *Metal Heat Treatment*, 2019, 44(4): 190–194.
(杨希锐, 邹建新, 宋利, 等. 长期时效下 15Cr1Mo1V 钢的显微组织及力学性能[J]. *金属热处理*, 2019, 44(4): 190–194.)
- [4] Yu Hang, Li Junzhao, Zhang Wangcheng, *et al.* Research progress of weld formation and performance control of thin plate TC4 titanium alloy by laser welding[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2022, 43(1): 53–66.
(于航, 李军兆, 张望成, 等. 薄壁TC4钛合金激光焊缝成型与性能调控研究进展[J]. *钢铁钒钛*, 2022, 43(1): 53–66.)
- [5] Dong Xianchun, Zhang Xi, Chen Yanqing. Microstructure and toughness in the coarse grain region of low carbon bainite high strength steel plate for Q690CFD[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2011, 32(1): 62–66.
(董现春, 张熹, 陈延清. 低碳贝氏体高强钢Q690CFD焊接粗晶区组织韧性[J]. *钢铁钒钛*, 2011, 32(1): 62–66.)
- [6] Li Dadong, Bai Wei, Deng Jian, *et al.* Study on vacuum electron beam welding process of 50 mm thick plate TC4 and TA17 titanium alloys[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2022, 43(3): 40–46.
(李大东, 白威, 邓健, 等. 50 mm厚板TC4及TA17钛合金真空电子束焊接工艺研究[J]. *钢铁钒钛*, 2022, 43(3): 40–46.)
- [7] Lü Yishi. Analysis of crack properties and causes of 15Cr1Mo1V steel welded joints in service [C]. The 4th Thermal Power Plant Metal Materials and Welding Technology Exchange Conference. Changzhou: China Electric Power Technology Network, 2016: 10–14.
(吕一仕. 在役15Cr1Mo1V钢焊接接头裂纹性质及原因分析[C]//第四届火电厂金属材料与焊接技术交流会. 常州: 中国电力科技网, 2016: 10–14.)
- [8] Yang Taiyong, Liang Hongbing, Ma Weimin. Study on microstructure and mechanical properties of hot repair welded joints of ZG15Cr1Mo1V steel [J]. *Hot Working Process*, 2018, 47 (19) : 226–229.
(杨太勇, 梁红兵, 马为民. ZG15Cr1Mo1V钢热补焊接头组织与力学性能研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(19): 226–229.)
- [9] Cao Xiaogang, Zhang Jin. Effect of heat treatment process on microstructure and properties of ZG15Cr1Mo1 steel[J]. *Casting Equipment and Process*, 2017, 3(6): 45–47.
(曹小刚, 张锦. 热处理工艺对ZG15Cr1Mo1钢组织和性能的影响[J]. *铸造设备与工艺*, 2017, 3(6): 45–47.)
- [10] Li Zhenjiang, Jia Pengju. Study on microstructure and mechanical properties of tempered 12Cr2Mo1V steel[J]. *Hot Working Process*, 2018, 47(6): 201–203.
(李振江, 贾鹏举. 12Cr2Mo1V钢回火的显微组织及力学性能研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(6): 201–203.)
- [11] Cao Rui, Liu Gang, Chen Jianhong, *et al.* The formation mechanism and research progress of DDC in nickel-based materials welding at high temperature [J]. *Welding*, 2018 (7) : 7–13, 65.
(曹睿, 刘刚, 陈剑虹, 等. 镍基材料焊接中高温失塑裂纹DDC的生成机理及研究进展[J]. *焊接*, 2018(7): 7–13, 65.)
- [12] Feng Jiecai, Liu Shulei, Luo Chuanwan, *et al.* Research status of dissimilar metal welding materials and methods for nuclear power[J]. *Welding*, 2022, (3): 52–57.
(冯杰才, 刘树磊, 骆传万, 等. 核电异种金属焊接材料及方法研究现状[J]. *焊接*, 2022, (3): 52–57.)
- [13] Huang Junbin, Huang Weigang. Effect of Ti on microstructure and mechanical properties of 9Cr-3Si-Al ferritic heat-resistant steel [J]. *Metal Heat Treatment*, 2020, 45 (11) : 11–15.
(黄俊斌, 黄维刚. Ti对9Cr-3Si-Al铁素体耐热钢微观组织及力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2020, 45(11): 11–15.)

编辑 邓淑惠

(上接第 175 页)

- [7] Ye Dalian, Gao Liqiang, Wang Ping, *et al.* Effect of cast and heat treatment processes on microstructure and properties of K4169 superalloy[J]. *Solid State Phenomena*, 2021, 315: 25–30.
- [8] Yu Huichen, Xie Shishu, Zhao Guangpu, *et al.* High temperature tensile and endurance properties of GH141 alloy[J]. *Materials Engineering*, 2003, (9): 3–6.
(于慧臣, 谢世殊, 赵光普, 等. GH141合金的高温拉伸及持久性能[J]. *材料工程*, 2003, (9): 3–6.)
- [9] Hu Renming, Xin Xin. The effect of Nb content on the structure and tensile properties of GH4169 alloy[J]. *Baosteel Technology*, 2020, 210(2): 35–38, 42.
(胡仁民, 信欣. Nb含量对GH4169合金组织和拉伸性能的影响[J]. *宝钢技术*, 2020, 210(2): 35–38, 42.)
- [10] Gao Tianming, Cheng Xiaonong, Luo Rui, *et al.* The effect of aging treatment on the microstructure and high temperature tensile deformation behavior of GH4169 alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(8): 126–130.
(高天明, 程晓农, 罗锐, 等. 时效处理对GH4169合金显微组织及高温拉伸变形行为的影响[J]. *金属热处理*, 2020, 45(8): 126–130.)
- [11] Xue Hao, Zhao Jingqi, Liu Yongkang, *et al.* δ -phase precipitation regularity of cold-rolled fine-grained GH4169 alloy plate and its effect on mechanical properties[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(12): 3287–3295.
- [12] Yu Jian, Li Jiarong, Han Mei, *et al.* Study on anisotropy of endurance properties of nearly [001] oriented DD6 single crystal superalloy at 980 °C/250 MPa[J]. *Materials Engineering*, 2012, (4): 1–5.
(喻健, 李嘉荣, 韩梅, 等. 近[001]取向DD6单晶高温合金980 °C/250 MPa持久性能各向异性研究[J]. *材料工程*, 2012, (4): 1–5.)
- [13] Zhou Xiaoming, Xia Pengcheng. Microstructure change and fracture analysis of an oriented superalloy during endurance[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2008, 3(2): 1–5.
(周晓明, 夏鹏成. 一种定向高温合金在持久过程中的组织变化及其断口分析[J]. *失效分析与预防*, 2008, 3(2): 1–5.)

编辑 唐 肖