

12Cr1MoVG 钢 TIG 焊接接头开裂原因

裴利霞¹, 曾 敏¹, 王文先², 杜计军¹, 周丽丹¹, 闫 浩¹

(1. 山西职业技术学院, 太原 030006; 2. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 太原 030024)

摘 要: 某电厂 12Cr1MoVG 钢钨极惰性气体保护电弧焊 (TIG) 焊接接头出现开裂现象。采用宏观观察、金相检验、扫描电镜和能谱分析、硬度测试等方法, 结合现场焊接工艺参数和低温再热器结构特点, 对接头开裂原因进行分析。结果表明: 12Cr1MoVG 钢焊接接头处裂纹属于再热裂纹; 泄漏的主要原因是焊接工艺执行不到位及焊缝熔合线在长期高温服役中产生时效偏析, 导致材料韧性下降、脆性增大, 在热膨胀应力和内压力的共同作用下裂纹加速扩展, 最终引起接头开裂泄漏。

关键词: 低温再热器; 12Cr1MoVG 钢; TIG 焊接接头; 焊接工艺优化; 再热裂纹

中图分类号: TG457.1; TG115.2

文献标志码: B

文章编号: 1001-4012(2026)03-0061-05

Cracking reason of TIG welded joint of 12Cr1MoVG steel

PEI Lixia¹, ZENG Min¹, WANG Wenxian², DU Jijun¹, ZHOU Lidan¹, YAN Hao¹

(1. Shanxi Polytechnic College, Taiyuan 030006, China; 2. College of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Cracking occurred in the welded joint of tungsten inert gas arc welding (TIG) of 12Cr1MoVG steel in a power plant. The causes of joint cracking were analyzed by means of macroscopic observation, metallographic examination, scanning electron microscope and energy spectrum analysis, hardness test, etc., combined with on-site welding process parameters and structural characteristics of low temperature reheater. The results show that the crack at the welded joint of 12Cr1MoVG steel belonged to reheat crack. The main reason for the leakage was that the implementation of the welding process was not in place and the weld fusion line generated aging segregation during long-term high-temperature service, resulting in a decrease in material toughness and an increase in brittleness. Under the combined action of thermal expansion stress and internal pressure, the crack accelerated and eventually caused the joint to crack and leak.

Keywords: low temperature reheater; 12Cr1MoVG steel; TIG welded joint; welding process optimization; reheat cracking

某电厂 1 号机组为 660 MW 超临界循环流化床机组。正常运行期间, 巡检人员发现 1 号锅炉左侧低温再热器出口集箱保温层表面有滴水现象。停炉后, 现场拆除检查, 确认泄漏点位于 1 号锅炉低温再热器出口管排中由炉左至炉右第 92 排管段的对接焊缝处。泄漏管规格为 57 mm×4.5 mm (外径×壁厚), 管材料为 12Cr1MoVG 钢。该管段运行最高温度约为 490 °C, 累计运行时间约为 10 000 h。12Cr1MoVG 钢属于珠光体低合金热强钢, 具有较高的热强性和

持久塑性, 长期以来 12Cr1MoVG 钢都是电站高温高压部件常用的耐热金属材料。该钢中含有 Cr、Mo、V 三种合金元素, 其中 Cr 元素和 Mo 元素起到基体固溶强化作用, V 元素与 C 元素结合形成 VC 等碳化物, 产生弥散强化效应, 从而使该钢保持良好的组织稳定性和较高的持久强度^[1-6]。随着超(超)临界机组的不断增多, 12Cr1MoVG 钢对接焊缝的开裂或泄漏仍是电厂锅炉运行的常见故障之一, 因此研究其焊接接头的开裂机制具有重要意义^[7-10]。笔者对低温再热器 12Cr1MoVG 钢焊接接头进行了一系列理化检验, 分析其开裂机制, 并针对现场情况提出了相应的改进措施^[11]。

收稿日期: 2024-12-10

作者简介: 裴利霞(1976—), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为金属材料增材制造

通信作者: 曾 敏(1982—), 女, 副教授, 15881074578@163.com

1 理化检验

1.1 宏观观察和低倍检验

泄漏焊缝裂纹位于集箱连接管短管与低温再热器管的对接焊缝处,具体处于低温再热器管侧的熔合线附近,裂纹沿焊缝周向延伸,其总长度超过整圈焊缝周长的3/4(见图1~2)。

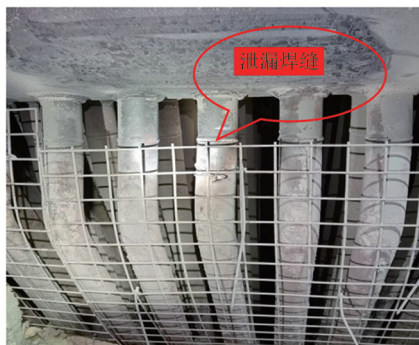


图1 低温再热器管现场泄漏位置



图2 低温再热器管泄漏整体宏观形貌

低温再热器管对接接头断口宏观形貌及低倍检验形貌如图3所示。由图3可知:裂纹呈环状开裂,

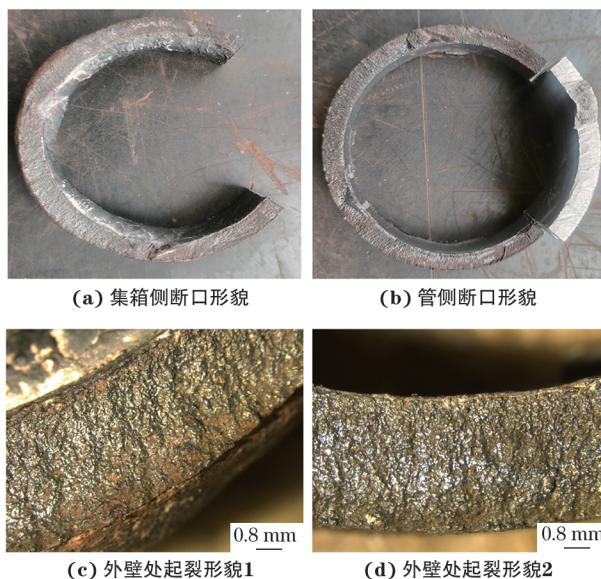


图3 低温再热器管对接接头断口宏观形貌及低倍检验形貌

无胀粗、塑性变形或机械损伤等特征;断口表面较为平齐,无金属光泽,呈黑褐色,氧化程度严重;裂纹自管体外壁向内壁扩展,大部分区域已贯穿整个壁厚,呈典型的脆性断裂特征。受高温高压蒸汽的作用,整个断口表面已被严重氧化破坏。

1.2 金相检验

用光学显微镜观察抛光状态下的试样,结果如图4所示。由图4可知:除可见裂纹外未发现其他缺陷,裂纹呈断续分布,具有沿晶扩展及分叉特征。用体积分数为4%的硝酸乙醇溶液腐蚀试样,再将试样置于光学显微镜下观察,结果如图5所示。低温再热器管不同区域的显微组织如表1所示。

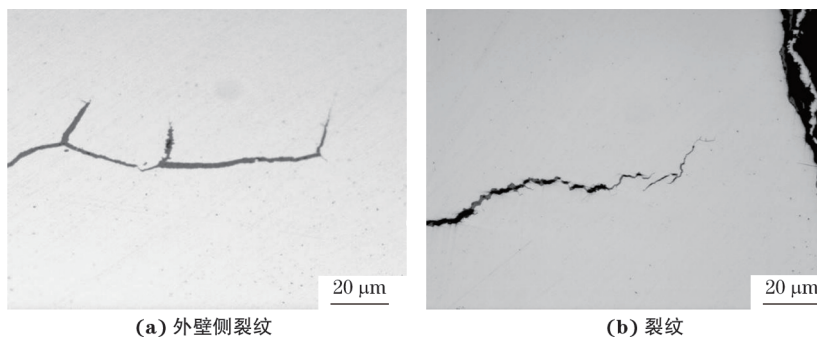


图4 低温再热器管对接接头裂纹微观形貌

1.3 扫描电镜(SEM)和能谱分析

蒸汽泄漏导致焊接接头断口发生高温氧化,断口表面有氧化物覆盖。将整个断口剖开后置于盛有丙酮的超声波清洗机中进行清洗,数分钟后取出再置于扫描电镜下观察,结果如图6所示。由图6可知:断口呈“冰糖状”形貌,具有典型的脆性沿晶断裂特征。断口的能谱分析结果如图7所示。由图7可知,

断口表面主要含有Fe、O元素,还含有少量的Na、Al、Si、P、S、Mn等元素。

1.4 硬度测试

在环状裂纹尖端部位沿纵向截取试样,对试样横截面进行镶嵌、研磨和抛光处理。以1 mm为间隔连续在试样上打点测试其硬度。测点起始于低温再热器管母材侧,依次穿过低温再热器管热影响区、焊

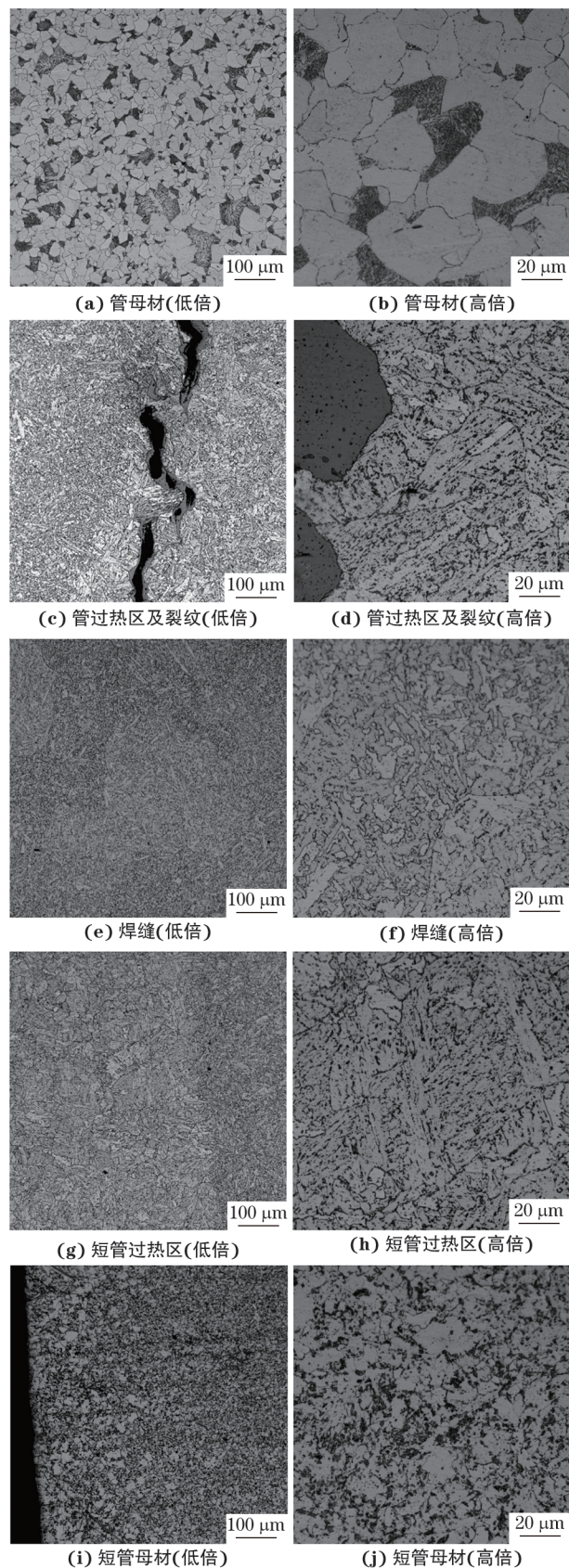


图5 低温再热器管对接接头不同区域的显微组织形貌

缝、集箱短管热影响区,直至集箱短管母材(因取样长度有限,该区测点较少),测量总长度约为20 mm。

表1 低温再热器管不同区域的显微组织

区域	显微组织
母材	铁素体+珠光体,球化2.0级(依据DL/T 773—2016《火电厂用12Cr1MoV钢球化评级标准》)
过热区	粒状贝氏体+沿晶分布细颗粒状碳化物;裂纹内壁有氧化腐蚀,沿晶分布
焊缝	粒状贝氏体+铁素体
集箱短管过热区	粒状贝氏体
集箱短管母材	—

低温再热器管对接接头的硬度分布曲线如图8所示。由图8可知:焊缝及过热区的显微硬度显著高于两侧母材。焊缝显微硬度普遍约为300 HV1,而母材硬度约为170~200 HV1。

根据DL/T 869—2021《火力发电厂焊接技术规程》规定,12Cr1MoVG钢中合金元素总含量应不大于3%(质量分数),焊缝布氏硬度应不大于270 HBW。焊缝及过热区的硬度明显高于母材(约170 HV1);一般情况下,显微硬度比布氏硬度高约10 HBW,推算该焊缝区域布氏硬度约为290 HBW,仍高于标准允许的最大值270 HBW。焊缝硬度偏高,表明焊接过程热输入较大,使焊缝组织硬化,塑性和韧性降低,从而增大了接头发生脆性断裂的风险。

2 综合分析

2.1 12Cr1MoVG钢的再热裂纹敏感性

依据大量试验,建立了定量评价1Cr-0.5Mo和0.5Cr-1Mo低合金钢的再热裂纹敏感系数的计算公式,如式(1)所示。

$$P_{SR} = w_{Cr} + w_{Cu} + 2w_{Mo} + 5w_{Ti} + 7w_{Nb} + 10w_V - 2 \quad (1)$$
 式中: P_{SR} 为再热裂纹敏感系数,当 $P_{SR} > 0$ 时,材料对再热裂纹敏感,接头易开裂,当 $P_{SR} \leq 0$ 时,材料对再热裂纹不敏感; w_{Cr} 、 w_{Cu} 、 w_{Mo} 、 w_{Ti} 、 w_{Nb} 、 w_V 分别为Cr、Cu、Mo、Ti、Nb、V的质量分数。

依据12Cr1MoVG钢的化学成分,计算得到 $P_{SR} = 2.1$,材料对再热裂纹敏感,接头易开裂。12Cr1MoVG钢中含有Cr、Mo、V等可导致沉淀强化效应的合金元素,其再热裂纹的敏感温度为500~700℃。该管段正常运行温度约为490℃,虽未处于敏感温度区间内,但其对接接头已服役近10 000 h。在长期运行温度下,接头经历了一个持续的时效过程,焊缝区域显微组织中析出弥散分布的碳化物颗粒,从而导致晶内强化。

2.2 12Cr1MoVG钢焊接工艺

开裂接头采用手工氩弧焊工艺,调阅该批次

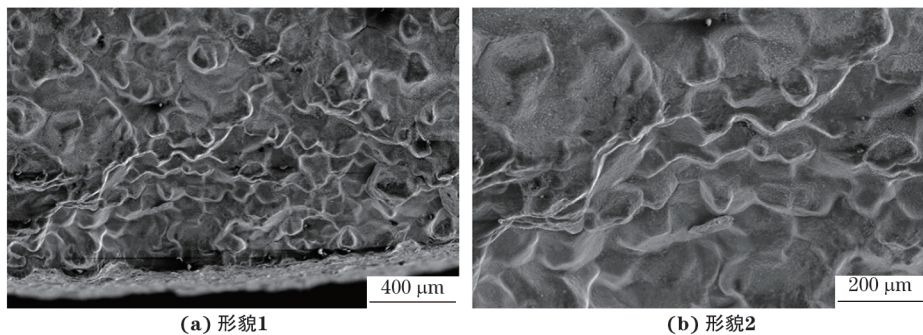


图6 低温再热器管断口SEM形貌

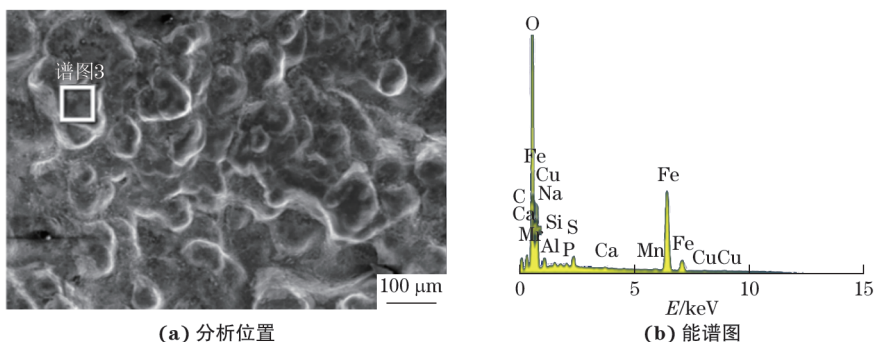


图7 低温再热器管断口能谱分析结果

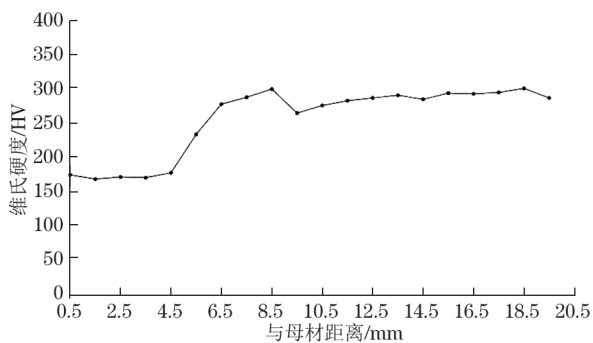


图8 低温再热器管对接头的硬度分布曲线

焊接记录显示,其焊接热输入为 $28\sim 34\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。一般而言,焊缝的再热裂纹敏感性随着热输入的增大而提高,工程实践中通常将热输入控制在 $25\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以内,从而有效降低热裂纹的敏感性^[12-13]。此外,焊缝硬度偏高及过热区显微组织中含有沿原奥氏体晶界分布的细小颗粒状碳化物,也进一步证明了焊接热输入偏大,从而增大了焊缝产生再热裂纹的倾向。

2.3 12Cr1MoVG钢焊接再热裂纹的开裂机制

裂纹位于集箱短管与低温再热器管焊接接头中低温再热器管侧的熔合线附近,沿周向呈环状开裂。宏观观察结果表明,裂纹起源于外壁,沿圆周方向呈撕裂状扩展。分析认为,裂纹在扩展过程中承受了较大的拉应力和弯曲应力,反映出管系结构布置设计存在不合理之处。微观断口呈“冰糖状”沿晶开

裂特征,金相检验结果也证实裂纹沿原奥氏体晶界扩展。

由于该批次焊缝焊接时热输入偏大、冷却速率较慢,导致焊缝显微组织粗大,焊缝原始硬度偏高;同时,焊缝区组织在长期服役的时效过程中析出弥散的 Mo_2C 和VC颗粒,发生合金碳化物弥散强化^[14-15],这也是服役后焊缝发生二次硬化的主要原因。泄漏接头已运行10 000 h,在时效过程中,焊缝区析出细小、弥散的碳化物颗粒,引起晶内强化。服役期间,管子在內压和外部应力的作用下,变形主要集中于晶界区域,当超过其变形能力时,裂纹便优先在晶界处萌生并扩展,最终形成再热裂纹,导致管开裂。

3 结语及改进措施

3.1 结语

低温再热器出口集箱12Cr1MoVG钢连接管的对接接头裂纹产生于熔合区,并沿管道周向在熔合区扩展;断口可见沿晶微裂纹,断口呈“冰糖状”形貌,断裂性质属于再热裂纹引起的沿晶脆性断裂。泄漏的主要原因为焊接工艺执行不当,以及焊缝熔合线在长期高温服役过程中发生时效偏析,导致材料韧性下降、脆性增大,在热膨胀应力和內压力的共同作用下,裂纹加速扩展,最终引发管开裂泄漏。

3.2 改进措施

(1)优化管子连接结构,在炉外增加一段柔性管

段,以缓解对接接头处的弯曲应力,并减小因机组启动后炉外穿墙低温再热器管与尾部烟道内管子升温速率不同引起的膨胀应力。

(2)焊前预热至200℃左右时,采用多道焊工艺,控制层间温度不超过300℃,并将焊接热输入限制在 $25\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以内,减少再热裂纹的数量。

参考文献:

- [1] 赵建仓,姚建华,成鹏,等. 超超临界锅炉12Cr1MoVG集箱角接头再热裂纹原因分析及焊接工艺优化[J]. 发电设备,2011,25(4): 274-277.
- [2] 杨军胜,陈元. 12Cr1MoVG钢屏式再热器爆管原因[J]. 理化检验(物理分册),2022,58(5): 54-58.
- [3] 董鹏,李海阳,赖威龙,等. 超超临界锅炉集箱角焊缝开裂分析及优化[J]. 发电设备,2024,38(3): 177-181.
- [4] 陈品同,张博智. 焊后热处理对12Cr1MoV钢管焊接接头组织与性能的影响[J]. 理化检验(物理分册),2014,50(3): 180-183.
- [5] 陈忠兵,赵彦芬,赵建仓,等. 厚壁12Cr1MoVG钢焊接接头裂纹分析及其控制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(35): 137-143.
- [6] 吴婷,湛立宁,卢俊文,等. 某锅炉12Cr1MoVG钢过热器管开裂失效的原因[J]. 腐蚀与防护,2024,45(5): 99-104.
- [7] 刘倩倩,句光宇,王志武. 12Cr1MoVG钢再热器管焊接接头断裂原因分析[J]. 金属热处理,2015,40(12): 181-184.
- [8] 章芳芳,应陈锴,胡建胜,等. 12Cr1MoVG钢高压蒸汽管道对接接头开裂原因[J]. 理化检验(物理分册),2022,58(7): 35-37.
- [9] 赵占辉,刘吉乐,孙浩,等. 厚壁12Cr1MoVG管道对接接头再热裂纹分析及焊接修复工艺[J]. 焊接技术,2020,49(增刊1): 181-184.
- [10] 司耀强,李军,武勇,等. 小径厚壁12Cr1MoVG钢管焊接接头裂纹分析及其控制[J]. 电站系统工程,2024,40(2): 80-82.
- [11] 李昱伟,张骁勇,周勇,等. 高温锅炉管T22/TP347H异种钢焊接接头早期失效原因[J]. 理化检验(物理分册),2023,59(1): 68-71.
- [12] 张新,张志刚,王晓茹,等. 电站锅炉用耐热钢管焊接接头再热裂纹研究进展[J]. 机械工程材料,2017,41(2): 8-14.
- [13] 韩一纯,陈学东,范志超,等. 热输入对2.25Cr1MoV钢粗晶热影响区再热裂纹敏感性的影响[J]. 机械工程学报,2015,51(6): 2-8.
- [14] 尹少华,王煜伟,孙志强,等. 长时高温时效对T23水冷壁焊接接头CGHAZ微观组织的影响[J]. 焊接学报,2024,45(1): 109-115.
- [15] 杨庆旭,王学,马君鹏,等. 超超临界锅炉水冷壁T23/12Cr1MoV异种钢焊接接头焊后热处理裂纹分析[J]. 金属热处理,2021,46(7): 218-222.