

失效分析

12Cr1MoVG 集箱三通焊缝横向开裂 原因分析及预防措施

闫侯霞

(内蒙古能源发电金山热电有限公司, 呼和浩特 010106)

摘 要: 为了解决某锅炉 12Cr1MoVG 集箱厚壁三通焊缝频繁出现横向开裂的问题, 通过对开裂焊缝母材壁厚范围和部件结构特点进行分析, 并采用宏观检验、化学成分分析、金相组织及断口微观分析等方法, 对开裂原因进行了分析, 并提出了开裂预防措施。结果表明, 三通焊缝开裂主要原因是焊接过程中焊接工艺执行不当, 焊缝中形成晶粒粗大区域并形成热裂纹, 运行中在循环应力作用下不断扩展并最终导致开裂。建议在机组施工中采取调整三通结构、严格执行焊接工艺及热处理工艺等措施预防焊缝开裂。

关键词: 12Cr1MoVG 钢; 焊缝; 开裂; 显微组织; 断口形貌

中图分类号: TG441

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.08.007

Cause Analysis and Preventive Measures for Tee Weld Horizontal Cracking of 12Cr1MoVG Header

YAN Houxia

(Inner Mongolia Energy Power Jinshan Thermoelectric Co., Ltd., Hohhot 010106, China)

Abstract: In order to solve the problem of frequent horizontal cracking in the thick wall tee weld of 12Cr1MoVG header, the causes of cracking are explored by analyzing the wall thickness range of the cracked weld base metal and the structural characteristics of the components, and by means of macro inspection, chemical composition analysis, metallographic structure and fracture microanalysis, and the preventive measures for cracking are put forward. The results show that the main cause of tee weld cracking is the improper execution of welding process, the formation of coarse grain areas and thermal cracks in the weld, and the continuous expansion of the thermal cracks under the action of cyclic stress during operation, which eventually leads to cracking. It is suggested to take measures such as adjusting the tee structure, strictly executing the welding process and heat treatment process in the unit construction to prevent weld cracking.

Key words: 12Cr1MoVG steel; weld; crack; microstructure; fracture morphology

1 概 述

某热电联产电站 1[#]、2[#] 锅炉为东方锅炉股份有限公司生产的 DG1065/18.2-Ⅱ 6 型锅炉, 为亚临界自然循环汽包炉, 单炉膛 Π 型布置。过热蒸汽温度调节采用三级喷水减温, 再热蒸

汽温度调节采用摆动燃烧器辅以喷水减温, 喷水作为细调。1[#] 锅炉 2009 年 1 月投产, 累计运行约 6.5 万 h; 2[#] 锅炉 2010 年 5 月投产, 累计运行约 6 万 h。

两台锅炉基建分别由两家施工单位安装, 在对两台锅炉过热器、再热器集箱连通管焊缝

进行无损检测普查时，发现多道过热器系统 12Cr1MoVG 材质的集箱连通管三通焊缝表面出现横向开裂。每台锅炉过热器系统连通管三通焊缝共有 12 道，其中 1# 锅炉安装中发现 1 道焊缝有一条横向裂纹，开裂焊缝数量占焊缝总数

量的 8.3%；2# 锅炉安装中发现 6 道焊缝环向均有多条横向裂纹，开裂焊缝数量占焊缝总数的 50%，焊缝开裂位置及开裂情况见表 1。另外，检查中并未发现连通管其他位置存在焊缝开裂情况。

表 1 锅炉过热器系统三通焊缝开裂情况统计结果

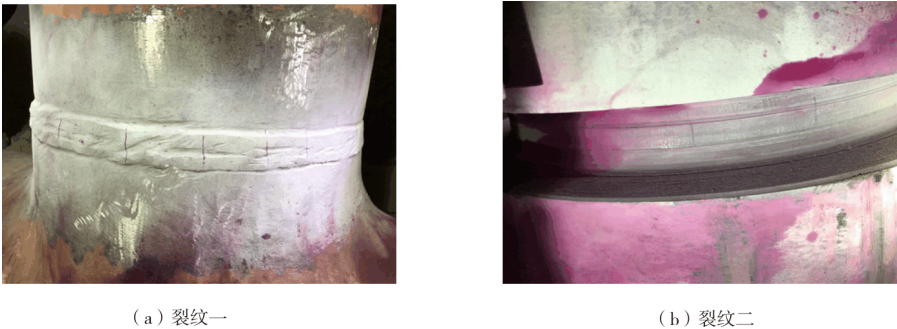
焊缝位置	三通规格/(mm×mm)	1# 锅炉三通焊缝裂纹情况	2# 锅炉三通焊缝裂纹情况
低过集箱出口	Φ609.6×55	未开裂	开裂，环向 5 条横向裂纹，环切至约 42 mm 时，4 条消失，1 条挖透
大屏甲侧集箱入口	Φ406.4×40	未开裂	未开裂
大屏乙侧集箱入口	Φ406.4×40	未开裂	未开裂
大屏甲侧集箱出口	Φ406.4×40	未开裂	未开裂
大屏乙侧集箱出口	Φ406.4×40	未开裂	未开裂
后屏甲侧集箱入口	Φ406.4×40	未开裂	未开裂
后屏乙侧集箱入口	Φ406.4×40	未开裂	未开裂
后屏甲侧集箱出口	Φ406.4×50	未开裂	开裂，环向 7 条横向裂纹，环切至约 34 mm 时裂纹消失
后屏乙侧集箱出口	Φ406.4×50	未开裂	开裂，环向 11 条横向裂纹，环切至约 35 mm 时裂纹消失
高过甲侧集箱入口	Φ406.4×50	未开裂	开裂，环向 14 条横向裂纹，环切至约 40 mm 时裂纹消失
高过乙侧集箱入口	Φ406.4×50	开裂，焊缝表面 1 条横向裂纹，局部挖至约 35 mm 时，裂纹消失	开裂，环向 8 条横向裂纹，环切至 37 mm 时 7 条裂纹消失，1 条挖透
高过集箱出口	Φ609.6×90	未开裂	开裂，环向 2 条横向裂纹，环切至约 45 mm 时裂纹消失

2 缺陷分析

2.1 裂纹宏观分析

通过对三通表面着色检测发现，焊缝裂纹均为平行于管道轴向的横向裂纹，裂纹形貌如图 1 所示。观察发现，裂纹从焊缝中心向两侧延伸，部分裂纹横跨整条焊缝延伸至母管，裂

纹开口细小，呈直线型，如图 1（a）所示。
对三通焊缝进行环切时发现，随着环切深度的增加，裂纹越来越短，开口越来越细，直至消失。多数开裂焊缝切削至 35~40 mm 深度时裂纹消失，少量裂纹几乎贯穿了整条焊缝，如图 1（b）所示。由此可见，裂纹是从焊缝表面开裂，逐渐向内延伸。



（a）裂纹一

（b）裂纹二

图 1 三通焊缝裂纹宏观形貌

2.2 部件结构分析

集箱与连通管均通过厚壁三通连接，三通两端连接集箱筒体，三通上端与连通管焊接相连，如图 2 所示。三通底部与集箱筒体一样，均布大量小径管排。连接焊缝的三通侧壁厚通常大于连通管侧壁厚 3~5 mm，因此三通与连通管焊缝下熔合线存在突变台阶，且三通脖颈较短，底部的大量小径管排在出厂时已经焊接就绪。当三通与连通管焊缝在进行热处理时，加热装置的布置受到限制，同时母材的壁厚差也



图 2 三通连接示意图

表 2 高温过热器入口三通焊缝熔敷金属 (R317) 化学成分

项目	化学成分/%							
	$w(C)$	$w(Si)$	$w(Mn)$	$w(Cr)$	$w(Mo)$	$w(V)$	$w(P)$	$w(S)$
实测值	0.08	0.33	0.70	1.18	0.33	0.28	0.020	0.010
标准值	0.05~0.12	≤ 0.60	≤ 0.90	0.80~1.50	0.40~0.65	0.10~0.35	≤ 0.035	≤ 0.035

2.4 断口微观形貌及金相组织观察

用扫描电镜对焊缝裂纹处断口表面进行观察发现，裂纹初始开裂部位呈现典型的沿晶开裂特征，部分区域有二次裂纹产生，且初始开裂部位晶粒相较于其他区域明显偏大，如图 3 所示。焊缝在结晶后，晶粒的大小、方向和形态对抗裂性都有很大的影响，晶粒越粗大，柱状晶的方向性越明显，则产生结晶裂纹的可能

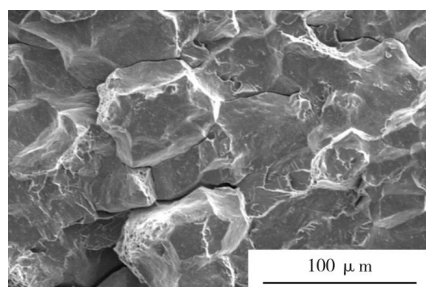


图 3 过热器三通焊缝裂纹断口形貌

会对热处理的均匀加热造成影响，使得焊缝的热处理效果不佳。

2.3 母材可焊性及焊缝熔敷金属化学分析

12Cr1MoVG 属于低合金热强钢，焊接性能良好^[1-3]，钢中除基体 Fe 元素外，主要含有 Mn、Cr、Mo、V 几种合金元素。其中，Mn 可与 S 形成 MnS 防止热脆现象，提高钢的淬透性^[4-5]，但同时具有增加晶粒粗化和回火脆性的不利影响；Cr、Mo、V 元素可以增加钢的淬透性，形成的化合物具有固溶强化、弥散强化和沉淀强化的作用^[6-8]。

12Cr1MoVG 钢中 $w(Mn)/w(S)=0.4/0.035\sim 0.7/0.035=11.43\sim 20.00$ 。当钢中的 $w(C)=0.11\%\sim 0.125\%$ 时， $w(Mn)/w(S)\geq 30$ 时才能防止热裂纹的产生，可见 12Cr1MoV 钢具有热裂纹倾向^[9-11]。

对该热电公司 2# 锅炉高温过热器甲侧入口三通焊缝取样进行化学成分检测，结果见表 2。由表 2 可以看出，接头焊缝熔敷金属的化学成分符合 DL/T 869—2012 标准对 R317 焊材的成分要求^[13-15]。

性就越大。焊缝柱状晶的生长方向一般由母材融合线附近或熔池边缘向熔池中心生长，与裂纹开裂方向一致^[16-17]。

对三通开裂焊缝试样进行显微组织观察，观察结果如图 4 所示。从图 4 (a) 可以看出，焊缝的组织为柱状晶形态的回火索氏体，未见过热组织及淬硬的马氏体等异常组织。在焊缝组织中除肉眼可见的裂纹外，还存在多处沿粗大的原奥氏体晶界分布的未形成裂纹的孔洞和微裂纹，微裂纹长度从几十微米至几百微米不等，孔洞及微裂纹内部存在氧化的情况，说明这些微裂纹形成温度较高，在焊接过程中已经形成微观不连续的缺陷，这些特征也与扫描电镜下看到的情况相印证。图 4 (b) 中明显可见分散的晶间孔穴，也有由孔穴串集而成的晶界开裂，并且具有热裂纹的开裂特征。

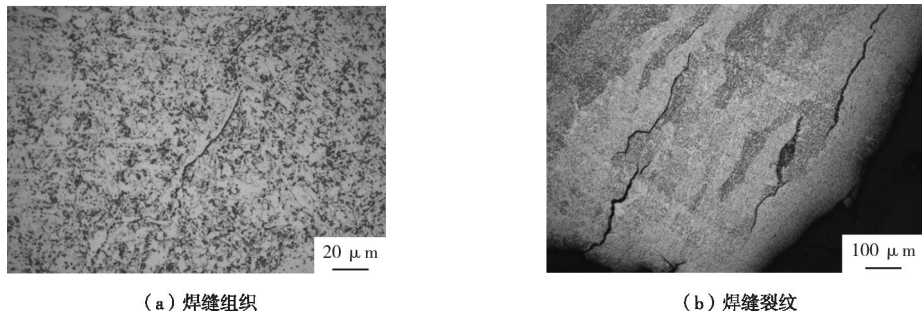


图 4 开裂焊缝微观组织

2.5 硬度检测分析

由于现场情况不具备进行破坏性试验的条件，未能取样进行拉伸试验，因此对两侧母材及开裂的过热器三通焊缝进行硬度测试，结果见表 3。从表 3 可以看出，焊缝实测布氏硬度值高于 DL/T 869—2012 标准的要求，由此可见，三通焊接接头的焊接热处理未达到要求，硬度偏大，致使焊缝韧性不足。

表 3 过热器三通焊缝硬度检测结果

项目	HBW (20 ℃)	
	母材	焊缝
实测值	168	286
标准值	135~195	不高于母材硬度+100，且 ≤270

1#、2# 两台锅炉安装中开裂焊缝位置均为集箱三通焊缝，且焊缝硬度值偏高，说明三通结构需要调整以减少对热处理效果的影响。可采取增加三通脖颈长度的措施，改善焊接热处理效果，降低焊缝硬度，提高焊缝韧性。

2.6 小 结

裂纹均产生于 12Cr1MoVG 厚壁三通焊缝，开裂焊缝母材壁厚均 ≥50 mm。通过对焊缝敷熔金属 (R317) 化学成分进行检测，结果表明焊缝化学成分符合要求，排除焊接材料错用的可能性。开裂焊缝硬度值高于标准值上限，说明受三通结构及热处理工艺等的影响，焊接接头的热处理效果没有达到要求，使得焊缝硬度偏高，韧性不足。裂纹开裂部位始于较大晶粒区域，焊接接头焊接工艺执行不当，焊接线能量过大，焊接过程中熔池面积大，在焊缝组织中形成晶粒粗大区域。

根据裂纹产生位置、特征及各项试验结果分析表明，三通焊缝裂纹属于热裂纹，运行中的管

道在高温高压介质的一次应力以及启停机和负荷变化中形成的二次应力作用下，焊缝内沿晶界分布的孔洞或细小结晶裂纹不断扩展形成宏观裂纹，由于焊缝外表面张力最大，所以裂纹最初沿表面开裂。

为了避免焊缝开裂，需严格执行焊接及热处理工艺，合理控制焊接速度且避免大规范焊接，合理、有效布置焊接热处理加热装置，完善施工质量监督控制体系，质量监督人员及操作人员应当切实履行职责并取得相关操作资格证书。

3 结 论

(1) 12Cr1MoVG 厚壁三通焊缝开裂主要原因是焊接过程中焊接工艺执行不当，焊接线能量过大，焊缝中形成晶粒粗大区域并形成热裂纹，在循环应力的作用下不断扩展并最终导致开裂。

(2) 通过调整三通结构，如增加三通脖颈长度，改善焊接热处理效果，降低焊缝硬度，可提高焊缝韧性。

(3) 在焊接过程中，应严格执行焊接及热处理工艺，合理控制焊接速度且避免大规范焊接，保证热处理效果，同时完善施工质量监督控制体系。

参考文献：

- [1] 曹海平,张紫平,康善娇. 蒸汽过热器换热管爆管失效原因分析[J]. 化肥设计,2017,55(1):13-16.
- [2] 张伟,何建军. 垃圾焚烧炉热管用 12Cr1MoVG 钢在不同碱金属混合熔盐中的热腐蚀行为[J]. 机械工程材料,2019,43(2):13-22.

(下转第 48 页)