

DOI: 10.19666/j.rlfed.202205101

## 带垫板异种钢焊缝缺陷与拉伸性能分析

汪峰<sup>1</sup>, 李梁<sup>2</sup>, 徐刚<sup>2</sup>, 张赵斐<sup>2</sup>, 李飞<sup>2</sup>, 徐敏<sup>2</sup>

(1. 华能国际电力股份有限公司南通电厂, 江苏 南通 226003;

2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

**[摘要]** 异种钢焊接是电厂锅炉受热面管广泛采用的一种连接方式。以某火电机组过热器出口段 TP304H 和 T22 为母材的带垫板异种钢焊接接头为研究对象, 通过宏观测量、微观组织分析、EDS 能谱检测和拉伸试验等研究, 分析了焊接接头中裂纹的生成机理及影响。结果表明: 3 种材料热膨胀系数差异及应力集中是带垫板异种钢焊缝裂纹产生的诱因, 裂纹在镍基焊缝填充材料中扩展; 室温拉伸时焊缝是薄弱环节, 而高温拉伸时熔合线和母材是断裂部位。

**[关键词]** 锅炉管; 异种钢焊缝; 裂纹; 垫板

**[引用本文格式]** 汪峰, 李梁, 徐刚, 等. 带垫板异种钢焊缝缺陷与拉伸性能分析[J]. 热力发电, 2023, 52(1): 170-176.  
WANG Feng, LI Liang, XU Gang, et al. Analysis on weld defects and tensile properties of dissimilar steel with backing plate[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 170-176.

### Analysis on weld defects and tensile properties of dissimilar steel with backing plate

WANG Feng<sup>1</sup>, LI Liang<sup>2</sup>, XU Gang<sup>2</sup>, ZHANG Zhaofei<sup>2</sup>, LI Fei<sup>2</sup>, XU Min<sup>2</sup>

(1. Nantong Power Plant of Huaneng International Power Co., Ltd., Nantong 226003, China;

2. Xi'an Thermal Power Generation Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Welding of dissimilar steels is a widely used connection method for super-heater tubes of boilers in power plants. Taking the TP304H/T22 dissimilar steel welded joint with backing plate at the superheater outlet of a thermal power unit as the research object, the formation mechanism and influence of cracks in the welded joint are analyzed through macro measurement, microstructure analysis, EDS energy spectrum detection and tensile test. The results show that, the differences in thermal expansion coefficients of the three substrates and stress concentration are the cause of the cracks of the dissimilar steel weld with backing plate and crack propagation in nickel base weld filler. The weld is the weak link in room temperature tension, while the fusion line and base metal are the fracture parts in high temperature tension.

**Key words:** boiler tube; dissimilar steel weld; crack; backing plate

随着“碳达峰”“碳中和”目标的提出, 火电机组的参数越来越高<sup>[1]</sup>, 高温受热面优先选择高温性能更好的奥氏体不锈钢材料, 使得异种钢焊缝越来越多; 其次新能源的快速发展, 需要火电机组提供深度调峰和灵活性运行的能力消纳新能源<sup>[2-4]</sup>, 导致异种钢焊缝使用条件越发严酷。以往研究表明, 广泛应用在火电厂承压部件<sup>[5-6]</sup>中的铁素体-奥氏体异种钢接头不仅承受结构应力、内压应力, 还承受着

机组启、停和负荷改变导致的温度变化引起的循环热应力及因氧化缺口、裂纹或缺陷等引起应力集中的损伤, 此外, 焊接应力、高温长期运行过程中的组织老化引起焊缝材料蠕变损伤等因素, 都可能导致异种钢焊接接头开裂<sup>[7-15]</sup>, 但对带垫板的异种钢焊缝则少有研究。

某电厂 1 号锅炉是 Babcock&Wilcox 公司生产的亚临界 350 MW 锅炉, 于 1989 年 9 月投产, 至

收稿日期: 2022-05-12 网络首发日期: 2023-01-02

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ20-G01)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ20-G01)

第一作者简介: 汪峰 (1970), 男, 助理工程师, 主要研究方向为火电锅炉检修和金属监督, 13862919100@163.com。

2019 年已运行 25 万 h, 其末级过热器出口设计压力为 19.93 MPa, 温度为 540.6 °C, 穿顶棚部位管子为柔性密封, 管子可自由膨胀。在二级过热器出口段顶棚上为 T22 与 TP304H 的带垫板异种钢焊缝, 此类焊缝自投运来未发生过泄漏, 但在 2019 年割管取样时发现此种焊缝内均存在裂纹。为明确该异种钢焊缝出现裂纹的原因及影响, 本文对该类焊接接头进行宏观形貌、显微组织、拉伸性能等研究, 并对裂纹产生机理及影响进行分析。

## 1 焊缝裂纹缺陷分析

本次分析共割取 5 根管样, 取 1 号、2 号管样加工拉伸试样, 分别进行室温及高温拉伸试验, 利用 1 号、2 号管样加工拉伸试样的余料加工金相试样, 取 3 号、4 号管样加工持久强度试样, 进行持久强度试验, 取 5 号管样加工弯曲试样。

金相试样编号分别为 a 和 b, 其中试样 a 进行宏观观察、显微观察, 试样 b 进行显微硬度测量、显微观察、扫描电镜观察。该焊缝焊接工艺采用带垫板异种钢焊接方式, 金相试样 a 取样位置为焊接接头的截面, 如图 1 所示。由图 1 可见, 坡口形状呈 V 型对称结构, 焊接区外围由两侧母材与垫板构成, 两侧母材分别为 TP304H、T22 管材, 其规格分

别为  $\Phi 50.8 \text{ mm} \times 7.4 \text{ mm}$ 、 $\Phi 50.8 \text{ mm} \times 12.2 \text{ mm}$ , 垫板材质为 T22, 采用 NiCrFe-2 焊条进行焊接, 两侧母材外壁平齐, T22 内壁未进行削薄处理。

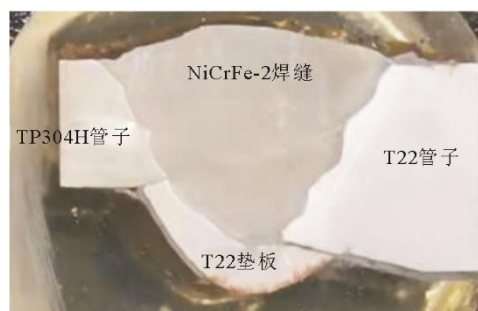
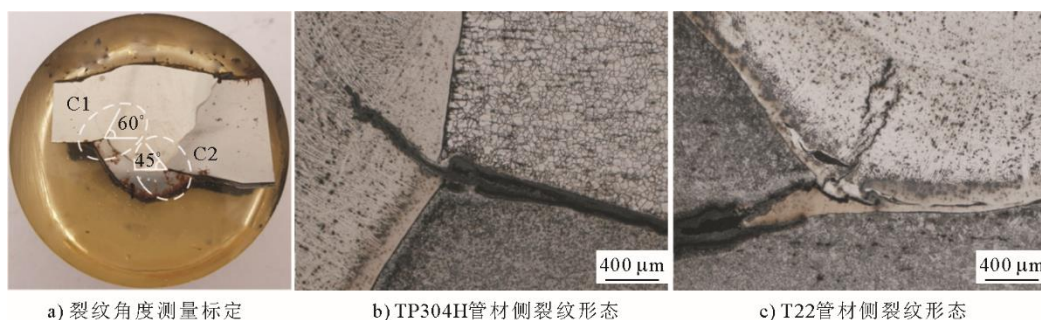


图 1 焊缝区局部横断面结构

Fig.1 Local cross section structure of the weld area

### 1.1 裂纹形貌宏观分析

试样 a 横截面裂纹宏观分析如图 2 所示。由图 2 可见: 试样 a 中焊缝两侧各存在 1 处裂纹, 金相宏观图表明两侧母材与垫板端部结合位置均向焊缝内部萌生裂纹 (图 2a), 其中 TP304H 侧的裂纹 C1 与管子内表面呈 60° 夹角, T22 侧裂纹 C2 与内管子表面呈 45° 夹角; TP304H 侧一条裂纹, 从 TP304H 母材、垫板及焊缝交界点位置起始开裂; T22 侧主裂纹有 2 条, 也是在 T22 母材、垫板及焊缝交界位置熔合线部位最先开裂, 此后向焊缝内部开裂。



a) 裂纹角度测量标定

b) TP304H 管材侧裂纹形态

c) T22 管材侧裂纹形态

图 2 试样 a 横截面裂纹宏观分析

Fig.2 Macro analysis of cross section crack of Sample a

### 1.2 焊缝显微硬度测量

采用 Qness Q30 型半自动维氏硬度计对试样 b 断面不同深度进行硬度值测定, 测量自熔合界线起向焊缝内或母材内方向编号, 编号原则为 M(H)-X, 其中 M 或 H 表示测点在母材或焊缝上, X 为测点序号, 数字越大离焊缝边界越远, 取各测点间隔为 1 mm, 试样 b 断面维氏硬度测点编号如图 3 所示, 测得各点维氏硬度值如图 4 所示。由图 4 可见, T22 侧硬度最高值出现在熔合线部位, 热影响区厚

度约为 3 mm, 母材硬度值已接近或低于 DL/T438—2016 要求下限值 125 HB (维氏硬度为 131 HV), TP304H 母材硬度值未见异常, 焊缝区硬度值也未见异常。

### 1.3 母材与焊缝金相组织

对试样 b 进行 4% 硝酸酒精及王水腐蚀后采用 ZEISS IMAGER A1m 型金相显微镜对母材和焊缝的显微组织进行表征, 焊缝母材及焊缝金相组织形貌如图 5 所示。

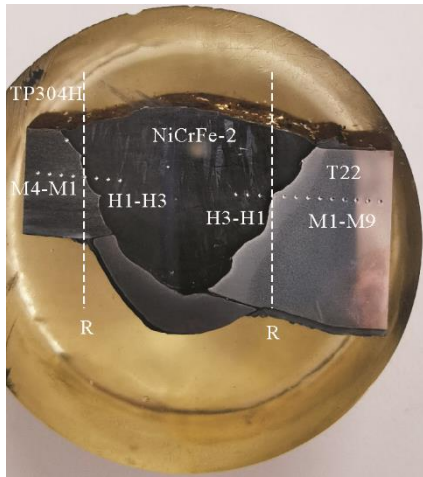


图 3 试样 b 断面维氏硬度测点编号

Fig.3 The number of Vickers hardness test point on section of Sample b

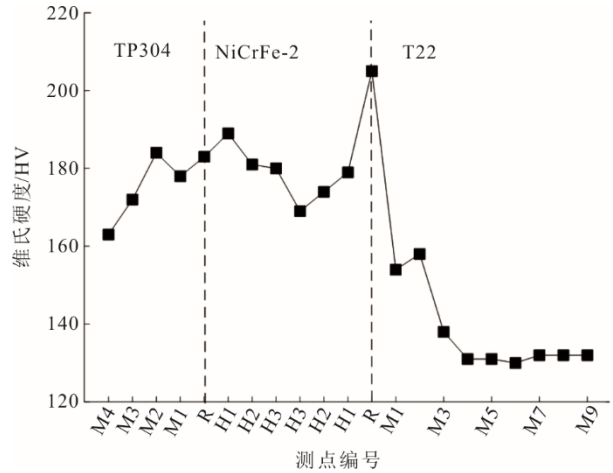


图 4 试样 b 维氏硬度分布

Fig.4 The Vickers hardness profile of Sample b

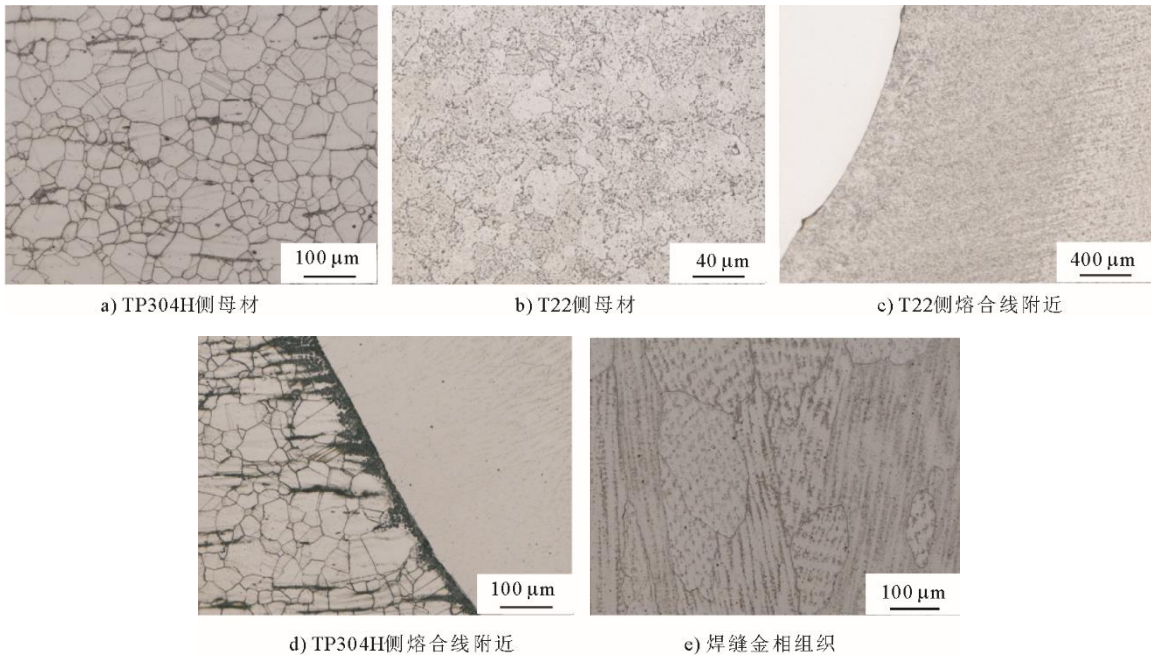


图 5 焊缝母材及焊缝金相组织形貌

Fig.5 The metallographic morphology of the weld base metal and weld

由图 5 可见：TP304H 为单一的奥氏体组织，晶粒尺寸均匀，为等轴晶，部分晶粒内存在孪晶，基体上存在少量析出相和夹杂物（图 5a），依据 DL/T 1422—2015 评为老化 2 级；图 5b)中 T22 母材组织为铁素体+珠光体+粒状贝氏体，珠光体及贝氏体已明显分散，碳化物呈球状分布在晶界上，贝氏体形态基本消失，依据 DL/T 999—2006 评为球化 3 级；TP304H 和 T22 母材在远离焊缝边界的组织均匀致密、形态完好，未见蠕变孔洞或裂纹等破坏性损伤；图 5c)、图 5d)分别为焊缝与 T22、TP304H 母材间的熔合线，可看出 T22 母材一侧存在明显的

热影响区，其厚度约为 3 mm，与维氏硬度结果相一致；而 TP304H 侧未发现明显的热影响区，这也与维氏硬度结果相符合；图 5e)为焊缝显微组织照片，可看出焊缝晶粒呈粗大枝状晶，晶内及晶界均有析出物，但并未发现老化时效相（ $\sigma$ 相）、晶间蠕变孔洞等组织老化特征。

## 2 缺陷显微组织与 EDS 检测

### 2.1 裂纹的显微观察

对试样 b 裂纹附近与焊缝微观金相组织进一步表征，熔合线近内壁垫板处缺陷形貌如图 6 所示。

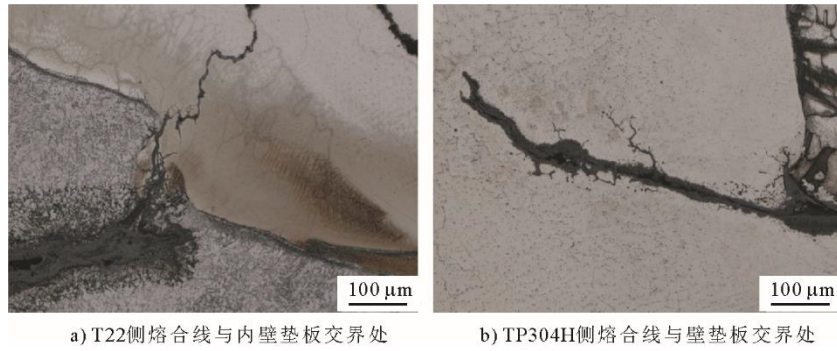


图 6 熔合线近内壁垫板处缺陷形貌  
 Fig.6 The defect morphology near inner wall backing plate of fusion line

由图 6 可见，裂纹附近 TP304H 与 T22 母材组织相较于远端区域无明显区别，在 T22 侧熔合线附近贝氏体形态仍较完好，原贝氏体区析出弥散分布碳化物，同时晶界处也析出一定数量的粒状碳化物，但并未形成链状，未发现蠕变孔洞和晶间裂纹等损伤特征。两侧的裂纹均是在焊缝、母材、垫板之间的边界线转折位置萌生，此后向焊缝内部扩展，在扩展过程中又诱发二次裂纹，从裂纹扩展路径及二次裂纹中可以发现裂纹主要为沿晶扩展，同时，发现在此裂纹萌生部位附近存在氧化腐蚀现象，氧化主要发生在三叉部位热影响区，除周围有氧化物颗粒外，顺着裂缝也有孔洞和腐蚀痕迹。

### 2.2 裂纹区域 EDS 检测

使用布鲁克 Xflash660X 射线能谱分析仪对裂纹区域进行能谱分析，焊缝两侧缺陷部位区 EDS 检测结果如图 7 所示。由图 7 可见：TP304H 侧裂纹区的裂纹主要在焊缝内部扩展（图 7a），除主裂纹外还存在若干沿焊缝边界上的细小裂纹，由 EDS 对靠边界近的 068、069 和 070 编号处的检测结果可知，其主要为 Fe、Cr、Mn、Ca 和 O 等元素（图 7c）；T22 侧裂纹尖端（图 7b）在 041、042 和 043 编号处主要检出了 Fe、Mn、Cr 和 O 等元素，其中，O 元素的质量分数分别为 23.17%、10.81%和 17.70%，这表明裂纹扩展过程中存在氧化腐蚀损伤（图 7d）。

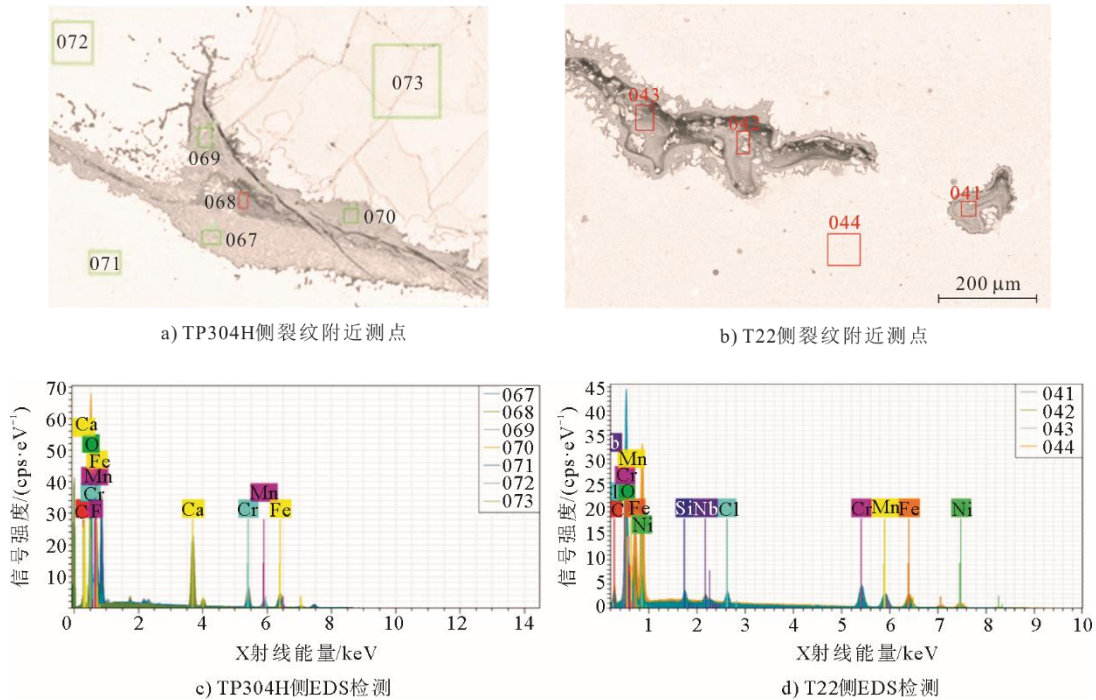


图 7 焊缝两侧缺陷部位区 EDS 检测  
 Fig.7 The EDS detection results of defective parts on both side of the weld

### 3 TP304H/T22 异种钢拉伸试验

#### 3.1 高温与室温拉伸分析

使用 1 号、2 号管样制作拉伸试样，每根管样制作 2 根拉伸试样，编号分别为 1a、1b、2a、2b。拉伸试验采用全壁厚矩形试样，高温与室温拉伸试验结果见表 1，高温与室温拉伸试样断口特征如图 8 所示。由图 8 可见：在高温拉伸试验中，试样 1a 的断裂发生在 TP304H 母材上，试样 1b 的断口位于 TP304H 侧母材熔合线（图 8a），断口与拉伸方向

呈 45°，裂纹尖端存在变形，在焊缝根部启裂于原始裂纹后，在很短的距离内延伸至熔合线后沿熔合线裂开，断后 TP304H 一侧焊缝根部存在小块焊缝填充金属，从裂纹至熔合线处的断口呈亮白色，原裂纹处断口呈黑色，裂纹在焊缝中的扩展区内呈亮白色，在熔合线扩展区内呈玫红色；在室温拉伸试验中，试样 2a 及 2b 均在焊缝处发生断裂，图 8b)为试样 2a 断裂后形貌，在裂纹尖端位置产生塑性变形后，裂纹沿垂直于拉伸方向扩展，在焊缝中断裂。

表 1 高温（550 °C）和室温的拉伸试验结果

Tab.1 The tensile test results at high temperature (550 °C) and room temperature

试样编号	抗拉强度 $R_m$ /MPa	断裂位置	标准抗拉强度/MPa
1a (高温拉伸)	389	TP304H 侧母材	JIS G4311—1981 要求 $\geq 381$ (TP304H)
1b (高温拉伸)	334	TP304H 侧熔合线	
2a (室温拉伸)	476	焊缝	ASME 213—2019 要求 $\geq 515$ (TP304H), $\geq 415$ (T22)
2b (室温拉伸)	330	焊缝	

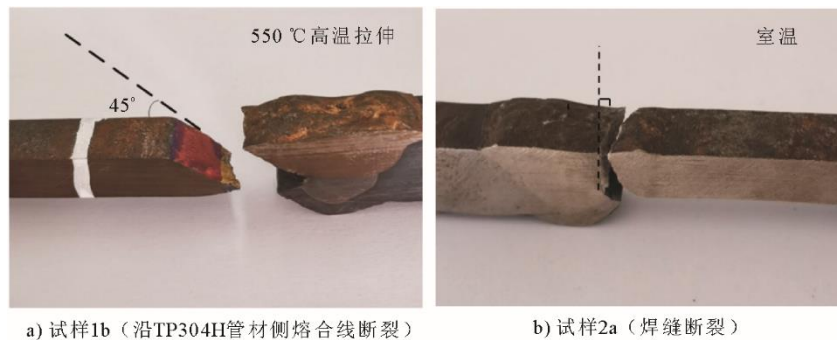


图 8 高温与室温拉伸试样断口特征

Fig.8 The fracture characteristics of tensile specimens at high temperature and room temperature

对比标准要求可发现，裂纹产生与扩展致使焊缝强度下降，试样 2a 和试样 2b 的室温抗拉强度已明显降低，高温拉伸中，断裂在 TP304H 侧熔合线的试样 1b 的抗拉强度也低于标准要求值，整个焊接接头的承载能力已低于标准要求的承载能力。

#### 3.2 高温持久拉伸分析

对 3 号和 4 号试样进行 550 °C 高温持久试验，断裂后形貌见如图 9 所示。由图 9 可见，试样 3 在 110 MPa 下 420 h 断裂，断裂发生在 T22 侧母材上，断口旁母材发生明显塑性变形；4 号试样在 100 MPa 下 1 055 h 断裂，近内壁 50% 区域断口位于 T22 管材侧熔合线上，近外壁 50% 区域内的 T22 母材发生了开裂，2 个试样在 TP304H 管材侧均未见损伤，保持完整性。

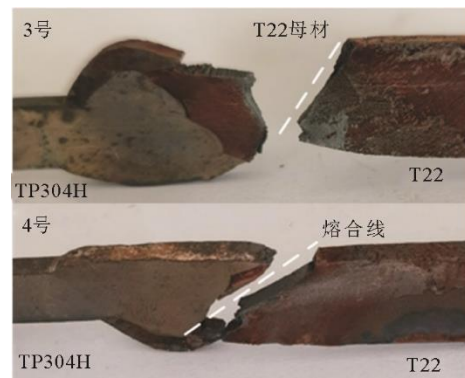


图 9 高温持久拉伸试验断口特征

Fig.9 The fracture characteristics of high temperature endurance tensile test

#### 3.3 背弯开裂断口分析

在对试样焊缝区弯曲试验中，面弯试验均合格。

取试样 5 开展焊缝根部受拉的背弯试验,发现背弯试验不合格,背弯过程中 TP304H 侧裂纹沿垂直于管子长度方向从内壁向外壁扩展,在近 TP304H 侧焊缝处发生断裂,裂纹旁焊缝填充金属发生明显塑性变形,断口呈灰色,原裂纹表面呈黑色。



图 10 背弯开裂断口形貌

Fig.10 The fracture morphology of back bend

## 4 分析与讨论

宏观观察的结果表明,与无垫板的异种钢焊缝不同,带垫板异种钢焊缝的裂纹萌生于母材、垫板、焊缝三者的交界处,向焊缝内部扩展。分析后认为:垫板与母材之间的缝隙的尖端是一个应力集中部位,在内压应力、结构应力的作用下,此部位焊缝内存在较大的应力,易萌生裂纹;此外,接头位置各材质间物理属性差异较大,特别热膨胀系数各不相同,T22、TP304H 及焊缝填充金属在 550 °C 时的平均热膨胀系数分别为  $14.6 \times 10^{-6}$ 、 $18.6 \times 10^{-6}$ 、 $15.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,材质热膨胀系数的差异,导致在交界处产生较大的热应力,加速了裂纹的萌生与扩展;对母材及焊缝的微观观察表明母材及焊缝均未发生危害性的老化损伤,说明裂纹与材质的老化无明显联系;虽然维氏硬度测量结果表明在焊缝与 T22 熔合线处存在硬度峰值且二者间存在较大的硬度差,但焊缝两侧的裂纹及焊缝与 TP304H 间硬度差异不大,说明硬度差异不是裂纹的萌生与扩展的主要原因,而微观分析发现裂纹主要为沿晶扩展,结合 EDS 检测的结果表明,氧化腐蚀作用加速了裂纹的萌生及扩展。

裂纹的存在降低了焊缝的强度,使得室温拉伸及弯曲试验中,试样均为裂纹在试验应力作用下在焊缝内扩展而发生破坏,且抗拉强度已低于标准要求值。但在高温拉伸中,裂纹未发生扩展而在 TP304H 母材发生破坏或扩展至 TP304H 侧熔合线

处沿熔合线发生破坏,其中断裂在 TP304H 侧熔合线的试样的抗拉强度低于标准要求值;在持久强度拉伸试验中,破坏发生在 T22 母材或 T22 侧的熔合线上。这些现象说明镍基填充金属的高温力学性能较好,在高温时,虽然有裂纹对焊缝承载能力的削弱,但在与两侧母材的竞争中仍属承载能力较强的部位,尤其在持久强度试验中,裂纹对整个焊接接头的承载能力基本没有影响。

综合分析后认为,在焊缝投入运行后,在内压应力、结构应力及不同热膨胀系数产生的热应力作用下,在母材、垫板、焊缝三者交界处萌生裂纹,并向焊缝内扩展,裂纹扩展一段距离后,由于其离开了三者交界的界面,所以因不同热膨胀系数产生的热应力快速下降,裂纹扩展速度也随之减缓;同时,虽然室温下焊缝由于裂纹的存在使得其承载能力下降,但通常锅炉管大部分承载是在高温下,室温下承载较小,而高温下由于焊缝的镍基填充金属的高温力学性能较好,裂纹对焊缝承载能力的削弱并不至于导致焊缝的破坏,这应是带垫板的 TP304H/T22 异种钢焊缝虽然在运行 25 万 h 后普遍存在裂纹但未发生泄漏的主要原因。

## 5 结 论

1) 母材、垫板、焊缝三者交界处的缝隙造成的应力集中,是 TP304H/T22 带垫板异种钢焊接接头产生裂纹的主要原因,而由于材质热膨胀系数差异产生的热应力及氧化腐蚀作用加速了裂纹的萌生与扩展。

2) 在裂纹影响下,室温拉伸及弯曲试验结果均表明室温下焊缝是最薄弱部位,高温短时拉伸 TP304H 管材侧熔合线处发生破坏,这 2 种情况下焊接接头的承载能力已低于标准要求。

3) T22 或 T22 焊接填充金属界面持久拉伸强度较 TP304H 管材、焊接填充金属低,高温持久拉伸试验时断裂发生在 T22 侧,而 TP304H 侧及焊缝虽存在裂纹,其本身保持完整性无损伤。

4) 为保证锅炉安全运行,在今后的运行中应加强对此类焊缝的检测与评估,新焊接焊缝应采用等厚结构,打底焊缝单面焊双面成型并避免使用带垫片的焊接形式。

### [参 考 文 献]

- [1] 王月明,姚明宇,张一帆,等. 煤电的低碳化发展路径研究[J] 热力发电, 2021, 51(1): 11-20.

- WANG Yueming, YAO Mingyu, ZHANG Yifan, et al. Study on low-carbon development path of coal-fired power generation[J]. Thermal Power Generation, 2021, 51(1): 11-20.
- [2] 吕志盛, 闫立伟, 罗艾青, 等. 新能源发电并网对电网电能质量的影响研究[J]. 华东电力, 2012(2): 251-256. LYU Zhisheng, YAN Liwei, LUO Aiqing, et al. Impact of new energy power grid-integration on grid power quality[J]. East China Electric Power, 2012(2): 251-256.
- [3] 王亚欧, 蔡亮, 胡忠旭, 等. 燃煤机组深度调峰运行下 SCR 入口烟温预测方法研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(8): 96-103. WANG Yaou, CAI Liang, HU Zhongxu, et al. SCR inlet gas temperature prediction technique under deep peak load regulation of thermal power generator units[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(8): 96-103.
- [4] 杨志平, 李柯润, 王宁玲, 等. 大数据背景下燃煤发电机组调峰经济性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 170-180. YANG Zhiping, LI Kerun, WANG Ningling, et al. Economic analysis of peaking regulation of coal-fired generating units under big data[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 170-180.
- [5] 王维斯, 吴强. T92 与 Super304H 异种钢焊接接头硬度异常分析及处理[J]. 金属功能材料, 2017, 24(1): 44-48. WANG Weisi, WU Qiang. Analysis and treatment of abnormal hardness on T92 and Super304H dissimilar steel welded joint[J]. Metallic Functional Material, 2017, 24(1): 44-48.
- [6] 范志东, 张志博, 徐刚, 等. 长期服役后 TP304H/T22 型异种钢焊缝失效原因分析[J]. 热加工工艺, 2019, 48(17): 175-178. FAN Zhidong, ZHANG Zhibo, XU Gang, et al. Failure reason analysis of TP304H/T22 type dissimilar steel weld after serving for long time[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(17): 175-178.
- [7] 李季, 陈志, 唐雨英, 等. 超超临界二次再热机组高温受热面 S30432 钢微观组织分析[J]. 热力发电, 2017, 46(8): 72-76. LI Ji, CHEN Zhi, TANG Liying, et al. Microstructure investigation on S30432 steel used for heating surface tubes of a double-reheat boiler[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(8): 72-76.
- [8] 王德伟, 胡从荣, 付志伟, 等. T22/TP310H 异种钢焊接接头的显微组织分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43(15): 47-49. WANG Dewei, HU Congrong, FU Zhiwei, et al. Analysis on microstructure of welded joint of T22/TP310H dissimilar steel[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(15): 47-49.
- [9] 王泽军, 许崇涛, 陈志刚. 12Cr1MoVG 高温管道中异种钢焊缝引起的局部热应力[J]. 压力容器, 2019, 36(8): 50-56. WANG Zejun, XU Chongtao, CHEN Zhigang. Local thermal stresses induced by a dissimilar weld in a 12Cr1MoVG high temperature piping system[J]. Pressure Vessel, 2019, 36(8): 50-56.
- [10] 陈国星, 胡金力, 吴树辉, 等. 12Cr1MoV 和 TP304H 异种钢焊缝失效分析[J]. 电力建设, 2011, 32(2): 84-87. CHEN Guoxing, HU Jinli, WU Shuhui, et al. Analysis on flaws of dissimilar steel weld joints for 12Cr1MoV and TP304H[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(2): 84-87.
- [11] 陈思杰, 赵丕峰. T91/12Cr2MoWVTiB 异种钢管 TLP 接头组织及断口形貌[J]. 热加工工艺, 2010, 39(17): 148-151. CHEN Sijie, ZHAO Pifeng. Microstructure and fracture morphology of TLP joint of T91/12Cr2MoWVTiB dissimilar steel tube[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(17): 148-151.
- [12] BLOUIN A, CHAPULIOT S, MARIE S, et al. Brittle fracture analysis of dissimilar metal welds[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 131(5): 58-73.
- [13] SHU X. Thermal stress analysis of dissimilar welding joints by finite element method[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 3860-3864.
- [14] 闵行, 赵挺, 王能道. 异种钢接头焊接残余应力分析及实验研究[J]. 机械强度, 1997(2): 17-20. MIN Xing, ZHAO Ting, WANG Nengdao. Analysis and experimental study of welding residual stresses of dissimilar metal welds[J]. Journal of Mechanical Strength, 1997(2): 17-20.
- [15] 刘德勇. TP347H/G102 末级过热器异种钢焊缝失效分析及处理[J]. 金属加工(热加工), 2020(8): 55-56. LIU Deyong. Failure analysis and treatment of TP347H/G102 dissimilar steel weld of final superheater[J]. MW Metal Forming, 2020(8): 55-56.

(责任编辑 邓玲惠)