

某 150 MW 塔式光热电站熔盐管道开裂原因分析

史志刚,冯铁玲,董红年,崔雄华
(西安热工研究院有限公司,陕西 西安 710054)

摘 要:某 150 MW 塔式光热电站的熔盐管道发生开裂泄漏,通过宏观形貌观察、化学成分分析、拉伸性能试验、冲击性能试验、维氏硬度试验、金相分析、断口形貌分析、微区成分等方法分析了管道的开裂原因。分析结果表明:熔盐管道的开裂属于热疲劳开裂,起源于角焊缝根部的管道外壁熔合区,引起管道开裂的主要原因是管道介质温度变化过程中护板与管道间产生的交变热应力。

关 键 词:光热电站;熔盐管道;热疲劳开裂

中图分类号:TG115 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.05.021

[引用本文格式]史志刚,冯铁玲,董红年,等.某 150 MW 塔式光热电站熔盐管道开裂原因分析[J].热能动力工程,2024,39(5):183-187. SHI Zhigang, FENG Tieling, DONG Hongnian, et al. Analysis of cracking cause of molten salt pipeline in a 150 MW tower photo-thermal power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(5): 183-187.

Analysis of Cracking Cause of Molten Salt Pipeline in a 150 MW Tower Photothermal Power Plant

SHI Zhigang, FENG Tieling, DONG Hongnian, CUI Xionghua
(Xi'an Thermal Power Research Institute, Xi'an, China, Post Code: 710054)

Abstract: The molten salt pipeline of a 150 MW tower photothermal power plant was cracked and leaked. The cracking cause of the pipeline was analyzed by means of macroscopic morphology observation, chemical composition analysis, tensile property test, impact property test, Vickers hardness test, metallographic analysis, fracture morphology analysis, micro-area composition and other methods. The results show that the failure mode of molten salt pipeline belongs to thermal fatigue cracking, which originates from the fusion zone of the outer wall of the pipeline at the root of the fillet weld. The main reason for pipeline cracking is the alternating thermal stress generated between the protective plate and the pipeline during the temperature change of the pipeline medium.

Key words: photothermal power station, molten salt pipeline, thermal fatigue cracking

引 言

塔式光热电站因其具有聚光倍数高、储/换热系统简单等优点,在国内外均取得了较快的发展与推广应用^[1]。熔盐管道系统主要包括熔盐吸热器连接管道系统、熔盐储热连接管道系统及蒸汽发生系统内熔盐连接管道。

由于光热电站随着天气情况变化每天至少启停

1 次的特殊运行工况,使得管道内导热介质二元或三元熔盐的温度每天在 300 ~ 565 °C 之间波动,熔盐的压力在 0.004 ~ 4.073 MPa 之间波动。由于熔盐具有较强腐蚀性,一般选用如 TP347H 等薄壁不锈钢作为熔盐管道材料,其壁温每天也随熔盐介质温度的波动在 300 ~ 520 °C 之间变化,管壁温变速率在 14 ~ 22 °C/min 之间。熔盐管道作为光热电站的重要部件之一,一旦发生开裂就会引起高温熔盐泄漏,

造成严重的设备损坏及电站停运^[2-4]。

某 150 MW 塔式光热电站的储热容量为 2 770 MW(7 h)、定日镜数量为 7 400(HE54)、导热介质为 60 % NaNO₃和 40% KNO₃ 的混合熔盐。热熔盐管道分两段,吸热器至出口熔盐罐间管道内介质的工作压力为 0.004 MPa、工作温度为 565 ℃,出口熔盐罐至热罐间管道内介质的工作压力为 1.985 MPa、工作温度为 565 ℃;随着管线标高的下降,工作温度不变,工作压力逐渐递增,分别为 2.769、3.747 和 4.073 MPa。

电站运行时发现光塔内的支架处热熔盐泄漏,随后检查发现 229 m 标高处的上升熔盐管道开裂泄漏,开裂位置位于护板短边焊缝(垂直于管道)根部对应的内壁母材位置,熔盐现场泄漏形貌如图 1 所示。电站从投产至本次泄漏已累计运行 1 843 h,等效运行 5 465 h,启停 217 次。开裂管道材料为 ASTM A312 TP347H,规格为 $\phi 610\text{ mm}\times 12.7\text{ mm}$;支架护板材料为 ASTM A312 TP347H,护板规格 $\phi 610\text{ mm}\times 17.48\text{ mm}$,宽度为 1/6 圆周;护板具体尺寸:轴向长度为 700 mm、环向圆弧长度为 319 mm、厚度为 17.48 mm。护板与管道间采用四条边均焊接连接,焊条为 E347-15,焊接层间温度不超过 150 ℃,焊后无热处理。电站根据天气情况每天至少启停 1 次,即开裂管道壁温每天变化一个循环以上,每天管道壁温最高为 520 ℃,最低为 300 ℃。管道壁温升降速率较快,由 300 ℃升至 520 ℃的时间差约为 10 min,温升速率 22 ℃/min;由 520 ℃降至 300 ℃的时间约为 15 min,温降速率 14.7 ℃/min。

本文以该 150 MW 塔式光热电站熔盐管道开裂泄漏为例,分析开裂的原因,以期为光热电站熔盐管道的长期安全运行提供技术依据。

1 理化检验及结果

1.1 宏观形貌

宏观检查发现,管道内壁存在 1 条长约 89 mm 的环向裂纹,其位置对应于外壁角焊缝根部;内壁裂纹部位存在明显的内凸变形痕迹;护板与管道母材间实测间隙在 1.2 ~ 4.0 mm 之间。管道的宏观形貌如图 1 所示。

1.2 化学成分

按照 GB/T 223 系列标准在管道母材上制取试样进行化学成分分析,结果表明,管道母材的化学成分符合 ASTM A312^[5]对 TP347H 化学成分的规定,

如表 1 所示。

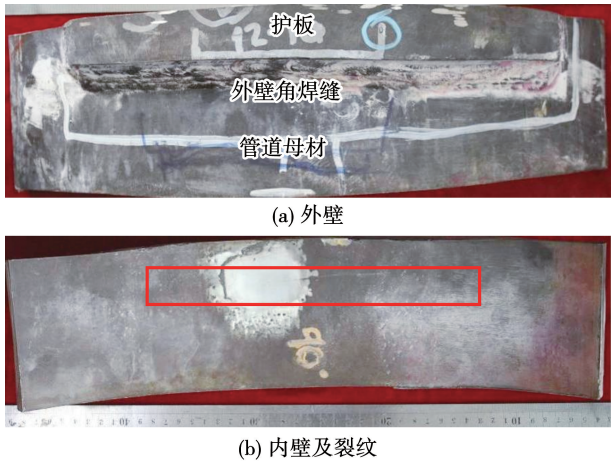


图 1 管道的宏观形貌
Fig. 1 Macromorphology of pipeline

表 1 化学成分分析结果(wt%)

Tab. 1 Results of chemical composition analysis (wt%)

元素	实测值	标准值 ^[5]
C	0.057	0.04 ~ 0.10
Si	0.350	≤0.75
Mn	1.220	≤2.00
S	0.001	≤0.03
P	0.035	≤0.04
Cr	17.550	17 ~ 20
Ni	9.230	9 ~ 13
Nb	0.460	0.057 ~ 1.00

1.3 拉伸性能

在管样母材上制取 4 个拉伸试样,按照 GB/T 228.1-2021^[6]和 GBT 228.2-2015^[7]在室温和 570 ℃下随机选取 2 个试样进行拉伸试验,结果表明,管样母材的室温拉伸性能符合 ASTM A312 对 TP347H 拉伸性能的规定,570 ℃下的拉伸性能未见异常,如表 2 所示。

表 2 拉伸试验结果
Tab. 2 Results of tensile test

数据类别	试验温度	规定塑性延伸强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
实测值	室温	283	667	64.0
实测值	室温	288	654	62.5
实测值	570 ℃	180	420	36.0
实测值	570 ℃	169	412	30.5
标准值	室温	≥255	≥205	≥515

1.4 冲击性能

在管样母材上制取 3 个 V 型缺口纵向的冲击试样,按照 GB/T 229 - 2020^[8] 进行室温冲击试验,冲击试验结果平均值为 144 J,表明管样母材的室温冲击吸收能量处于较高水平。

1.5 裂纹金相形貌

在管样开裂部位制取 1 个纵向金相样,在金相显微镜下进行金相检验,管样金相形貌如图 2 所示。

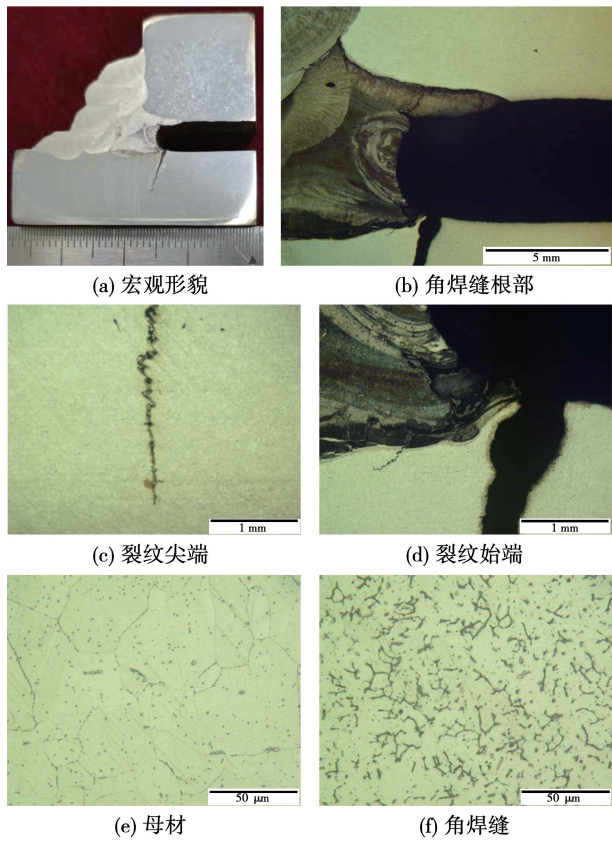


图 2 管样的金相形貌

Fig.2 Metallographic morphology of pipeline sample

由图 2 可知,管样母材的组织为奥氏体,其未见老化;管道母材的晶粒度为 6 级,符合 ASTM A312 对 TP347H 的规定;裂纹从焊缝根部的管道外壁熔合区部位开裂,沿管道径向穿晶向内壁扩展,尖端未见分叉,焊缝根部的焊缝及热影响区存在多条小裂纹。

1.6 维氏硬度

按照 GB/T4340.1 - 2009^[9] 在 HVS - 50 型维氏硬度机上对金相样进行维氏硬度试验,试验载荷 98 N,保载时间 12 s,每个位置各测 3 点,测试位置如图 3 所示,结果如表 3 所示,远离裂纹管道母材的

维氏硬度符合 ASTM A312 对 TP347H 的规定,远离裂纹的热影响区和焊缝的位置,维氏硬度未见异常,紧邻裂纹的管道母材和焊缝的维氏硬度明显比远离裂纹部位偏高。

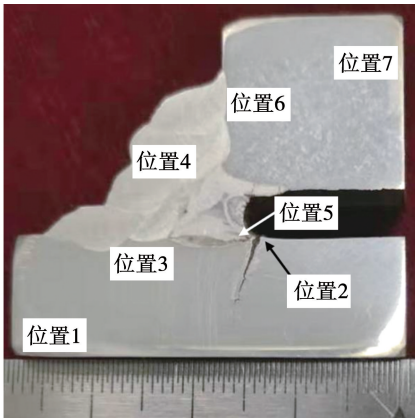


图 3 硬度测试位置

Fig.3 Hardness test location

表 3 维氏硬度试验结果

Tab.3 Vickers hardness test results

测试位置	标准值	试验结果
1	≤200	197,202,198
2	≤200	252,250,259
3	≤200	200,199,194
4	≤200	218,213,219
5	≤200	288,281,279
6	≤200	190,181,189
7	≤200	188,186,179

1.7 断口形貌

将管道母材上的裂纹打开,宏观形貌如图 4 所示。在扫描电镜下对裂纹断口形貌进行观察,如图 5 所示。由图 4 可见,宏观下裂纹断面较平整,隐约可见疲劳弧线。由图 5 可知,扫描电镜下,裂纹断面中部可见疲劳弧线,裂纹断面一侧尖端明显可见疲劳弧线、疲劳条带及多条二次裂纹。



图 4 裂纹断口的宏观形貌

Fig.4 Macromorphology of fracture surfaces

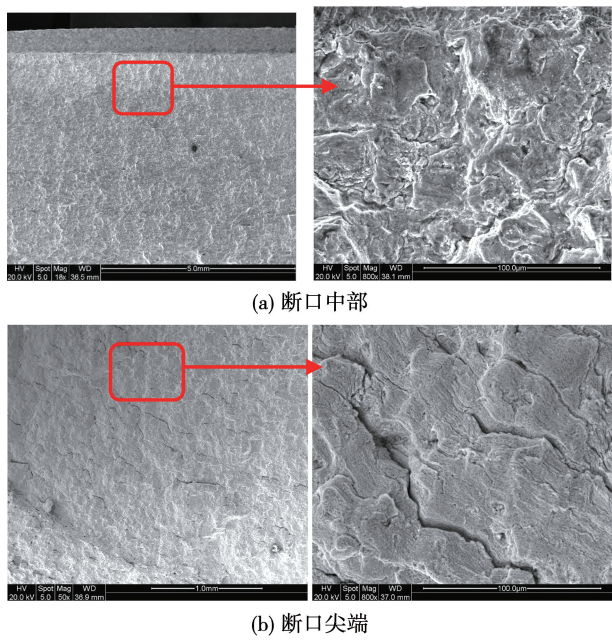


图 5 裂纹断口扫描电镜形貌

Fig. 5 Scanning electron microscope images of fracture surfaces

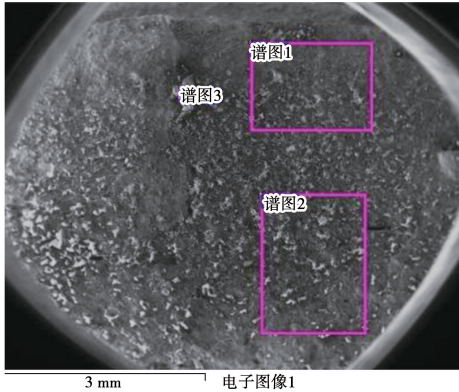


图 6 裂纹断口能谱测试位置

Fig. 6 Energy spectrum test location of fracture surfaces

表 4 裂纹断口能谱试测试结果 (wt %)

Tab. 4 Energy spectrum test results of fracture surfaces (wt %)

谱图号	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
1	31.78	2.28	3.16	1.78	4.09	0.31	0.50	0.60	6.92	1.02	41.41	2.42	3.72
2	32.69	1.96	3.99	1.60	4.44	0.18	0.74	0.32	7.48	1.05	39.71	2.08	3.77
3	23.81	1.89	1.80	1.33	2.57	0.56	0.72	1.19	5.82	1.01	52.56	4.48	2.25

2 开裂原因分析

由理化检验结果可知:管道母材的化学成分、室温和 570 ℃ 拉伸性能、室温冲击吸收能量、维氏硬度、金相组织和晶粒度符合标准的规定或未见异常;角焊缝的硬度和金相组织符合参照标准的规定或未见异常。

宏观下,管道母材内壁存在一条长约 89 mm 的环向裂纹,其位置对应于外壁角焊缝根部;裂纹断口较平整,隐约可见疲劳弧线。扫描电镜下,裂纹断面中部可见疲劳弧线,裂纹断面一侧尖端明显可见疲劳弧线、疲劳条带及多条二次裂纹。金相下,可见裂纹从焊缝根部的管道外壁熔合区部位开裂,沿管道径向呈穿晶向内壁扩展,裂纹尖端未见分叉;能谱分析断口上未见腐蚀性元素。依据以上特征判断管道的失效模式属于热疲劳开裂,起源于焊缝根部的管

1.8 微区成分

用能谱仪对裂纹断口进行能谱成分分析,测试部位如图 6 所示,测试结果如表 4 所示,断口上存在的少量 Na 和 K 元素应是来自管道内的熔盐,断口上主要为金属基体元素和氧元素,未见腐蚀性元素。

道外壁熔合区。

熔盐管道开裂部位的支架属于固定支架,支架护板四周与管道外壁焊接相连接,由于护板与管道间存在一定的间隙,故在管道壁温升降过程中,护板与管道间不可避免的存在一定温差,角焊缝的约束会在焊缝根部附近产生较高的热胀应力。

管道介质温度每天在 300 ℃ 至 520 ℃ 间热循环变化,在管道介质以 22 ℃/min 快速从 300 ℃ 升至 520 ℃ 过程中,护板壁温升温速率会明显滞后于管道,即护板壁温低于管道壁温且其壁温差会持续增大,引起护板和管道间轴向膨胀量不一致且管道的轴向膨胀量大于护板,因护板和管道间角焊缝的约束,会在焊缝根部管道外壁产生很大的热胀压应力;在管道介质以 14.6 ℃/min 快速从 520 ℃ 降至 300 ℃ 过程中,同理,护板壁温会高于管道壁温且壁温差也会持续增大,同样引起护板和管道间轴向膨胀量不

一致,这时护板和管道间产生的热胀应力为拉应力,与升温过程相反;该热胀应力随着管道介质温度热循环变化工况下在焊缝根部管道外壁产生热疲劳损伤,逐渐萌生疲劳裂纹,裂纹不断扩展直至泄漏。

宏观下管道内壁裂纹部位存在明显的内凸变形痕迹及紧邻裂纹的管道母材和焊缝的维氏硬度明显比远离裂纹部位的偏高等试验结果,也证明了焊缝根部及其附近管道母材存在热疲劳损伤、塑性变形及形变硬化。由电站共启停 217 次和裂纹处有塑性变形可知,裂纹为低周疲劳开裂,进而可知启停过程中焊缝根部管道外壁部位的轴向热胀应力明显高于材料运行温度(300 ~ 565 ℃)下规定的塑性延伸强度。

3 结论及建议

(1) 管道母材和角焊缝的各项材质试验结果符合参照标准的规定或未见异常。

(2) 该 150 MW 光热电站熔盐管道的失效模式属于热疲劳开裂,起源于角焊缝根部的管道外壁熔合区;在管道介质温度变化过程中,护板与管道间产生温差及轴向胀差,导致角焊缝根部在角焊缝约束引起的交变热应力作用下产生疲劳损伤,损伤累积到一定程度萌生裂纹,并扩展至裂透,导致熔盐泄漏。

(3) 建议对支架护板进行结构优化,避免在角焊缝根部产生过大的交变热应力,必要时可改变支架的型式。

参考文献:

[1] 刘新元,程雪婷,薄利明,等.考虑源荷协调的含储热光热电站和风电系统的日前-日内调度策略[J].中国电力,2021,54(8):144-153.
LIU Xinyuan, CHENG Xueting, BO Liming, et al. Day-ahead and intra-day scheduling strategy of concentrated solar power station with thermal energy storage and wind farm considering coordination

between generation and load[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 144-153.
[2] 王惠杰,董学会,咎永超,等.熔盐储热型塔式太阳能与燃煤机组耦合方式及热力性能分析[J].热力发电,2019,48(7): 47-52.
WANG Huijie, DONG Xuehui, ZAN Yongchao, et al. Coupling method and thermal performance analysis for molten salt heat storage tower solar energy power station and thermal power unit[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(7): 47-52.
[3] 童家麟,吕洪坤,李汝萍,等.国内光热发电现状及应用前景综述[J].浙江电力,2019,38(12):25-30.
TONG Jialin, LYU Hongkun, LI Ruping, et al. Review on status and application prospect of domestic CSP generation[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(12): 25-30.
[4] 金 珊,李有霞,臧平伟,等.太阳能光热发电项目熔盐蒸汽发生系统整体布置研究[J].东方电气评论,2018,32(4): 80-83.
JIN Shan, LI Youxia, ZANG Pingwei, et al. The whole layout study of molten salt steam generation system in solar thermal power generation project[J]. Dongfang Electric Review, 2018, 32(4): 80-83.
[5] ASTM A312-2013: Standard specification for seamless, welded, and heavily cold worked austenitic stainless steel pipes[S].
[6] GB/T228.1-2021:金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法[S].
GB/T228.1-2021: Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature[S].
[7] GB/T228.2-2015:金属材料 拉伸试验 第2部分:高温试验方法[S].
GB/T228.2-2015: Metallic materials - Tensile testing - Part 2: Method of test at elevated temperature[S].
[8] GB/T229-2020:金属材料 夏比摆锤冲击试验方法[S].
GB/T229-2020: Metallic materials - Charpy pendulum impact test method[S].
[9] GB/T4340.1-2009:金属材料 维氏硬度试验 第1部分:试验方法[S].
GB/T4340.1-2009: Metallic materials - Vickers hardness test - Part 1: Test method[S].

(姜雪梅 编辑)