

- 材料失效分析 Material Failure Analysis •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.11.020

某超(超)临界锅炉温度套管失效原因分析

李鹏刚¹,王 强²

(1. 华电电力科学研究院有限公司 浙江 杭州 313300; 2. 西安热工研究院有限公司 陕西 西安 710054)

摘 要:为了解超(超)临界锅炉温度套管断裂原因,采用宏观检查、化学成分分析、金相检验、硬度测量、断口形貌分析、ANSYS 有限元分析,对断裂温度套管的失效原因进行了分析。结果表明,温度套管在交变应力作用下萌生疲劳裂纹,并不断扩展,最终导致套管断裂。

关键词:温度套管;断裂;失效;疲劳;裂纹

中图分类号: TG115

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2019)11-1211-04

Failure Reason Analysis of Temperature Casing in Supercritical/Ultra Supercritical Boiler

LI Penggang¹, WANG Qiang²

(1. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 313300, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to understand the fracture reason of the temperature sleeve of the supercritical boiler, the failure reason of the temperature sleeve of the supercritical boiler was analyzed by means of macroscopic examination, chemical composition analysis, metallographic examination, hardness measurement, fracture morphology analysis and ANSYS finite element analysis. The results show that the fatigue crack of the temperature casing is initiated under the action of alternating stress, and the fatigue crack is extended continuously, which finally causes the casing fracture.

Key words: temperature casing; fracture; failure; fatigue; crack

研究对象为哈尔滨锅炉厂超(超)临界变压运行直流锅炉,Ⅱ型布置、单炉膛、一次中间再热、低NOX主燃烧器和高位燃尽风分级燃烧技术、反向双切圆燃烧方式,炉膛为内螺纹管垂直上升膜式水冷壁,大气扩容式启动系统。调温方式除煤/水比外,还采用烟气分配挡板、燃烧器摆动、喷水减温等方式。锅炉过热器采用三级减温方式进行调温,减温器前设计有热电偶测点,每个热电偶分别配套一个热电偶温度套管,套管材质为F91,为铸造锻压套管。投产以来,发现三级减温器前测温套管共断裂9次,每次断裂的位置相似。目前已有一些这方面的研究报道^[1-6],因此有必要对该类铸造锻压温度套管断裂原因进行研究分析,并提出针对性防范措施。

1 试验结果与分析

1.1 宏观检查

图1为断裂测温套管样品整体形貌与典型失效

形貌。经宏观检查,发现套管外壁整体呈灰黑色,部分区域存在外壁氧化皮脱落现象;套管外壁与集箱开孔起限位作用的配合凸台处存在明显的反复碰磨痕迹。结合测温套管装配图(图2),可知套管断裂于R2.5倒圆角处。断裂源区位于套管样品一侧外壁,由于反复挤压、摩擦,该区域较为平坦、光亮;扩展区断口具有一定的“皿型”断口形貌特征,整体未见明显的塑性变形痕迹,并存在宏观可见的疲劳辉纹;瞬断区断口位于源区对侧延伸至套管为止,具有不平坦的粗糙表面,见图1(b、c)。

1.2 化学成分分析

对测温套管制取碎屑试样,依据GB/T 223《钢铁及合金化学分析方法》进行化学成分分析,结果如表1所示。可以看出,测温套管的化学成分符合ASME SA-182对F91的要求。

1.3 金相检验

根据GB/T 13298-2015《金属显微组织检验方法》,在距离断口10 mm处截取横截面金相试样,试样依次经过砂纸预磨和机械抛光,用三氯化铁盐酸水溶液侵蚀后,依据GB/T 13299-1991《钢的显微组织评定方法》在激光共聚焦显微镜下进行金相组织观察,并按照DL/T 884-2004《火电厂金相检验与评

收稿日期: 2019-08-13

作者简介: 李鹏刚(1987-),陕西咸阳人,工程师。研究方向:火力发电厂金属技术监督、锅炉压力容器定期检验、发电厂金属部件失效分析。电话:13123910083, E-mail: penggang-li@chder.com



(a)断裂套管整体形貌



(b)断裂套管断口(一侧)形貌



(c)断裂套管断口(另一侧)形貌



(d)凸台碰磨形貌



(e)凸台碰磨形貌(放大)

图1 断裂测温套管样品整体形貌与典型失效形貌

Fig.1 Macro appearance and failure appearance of fractured casing

表1 化学成分分析结果 $w(\%)$

Tab.1 Measured chemical composition of the sample

元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	V
套管样品	0.12	0.29	0.40	0.012	0.008	0.30	8.50	1.02	0.08	0.21
F91 (ASME SA-182)	0.08~0.12	0.20~0.50	0.30~0.60	≤ 0.020	≤ 0.010	≤ 0.40	8.00~9.50	0.85~1.05	0.06~0.10	0.18~0.25

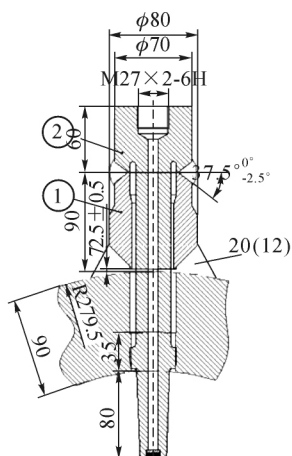
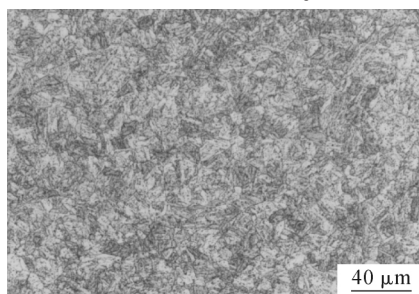


图2 测温套管装配图/mm

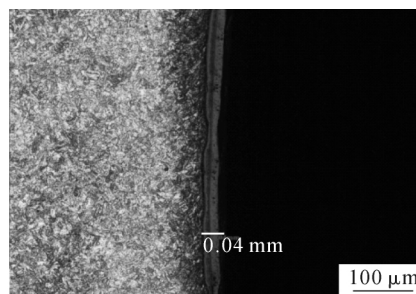
Fig.2 Assembly drawing of temperature measuring sleeve

定技术导则》对材料进行组织老化评定。

图3为送检测温套管的金相组织形貌。可以看



(a)套管金相组织



(b)套管内壁氧化皮

图3 测温套管金相组织及其内壁氧化皮

Fig.3 Metallographic and morphology of oxide skin on inner of measuring casing

出,显微组织为回火马氏体,马氏体板条位向清晰,碳化物尺寸较小,且均匀的分布在晶内,套管内壁氧化皮厚度为0.04 mm,老化评级为2级,为轻度老化。

1.4 维氏硬度试验

根据 GB/T 4340.1-2009《金属材料维氏硬度试验 第1部分:试验方法》,在维氏硬度试验机上对金相试样进行维氏硬度试验,试验力为200 gf,加载时间10 s,沿圆周方向每隔120°进行一次测试,结果列于表2。可以看出,测温套管的维氏硬度平均值为217 HV。根据 GB/T 1172-1999《黑色金属硬度及强度换算值》,换算为布氏硬度为213 HB。测温套管的硬度满足 DL/T 438-2016 及 ASME SA-182 对 F91 新管的要求。

1.5 断口分析

表 2 硬度试验结果
Tab.2 Hardness test results

试样及标准	硬度测量值(HV)			平均值(HV)
	测点 1	测点 2	测点 3	
金相样品	220	215	216	217
DL/T 438-2016 F91	175~248 HB			
ASME SA-182F91	≤248 HB			

采用扫描电子显微镜对套管断口进行扫描电镜观察及分析^[7],形貌如图 4 所示。可以看出,在测温套管内壁附近存在疲劳辉纹,断面未发现明显的裂纹及缺陷(图 4b),瞬断区形貌为典型的台阶状解理断口(图 4c)。由断口形貌分析,断裂模式为疲劳断裂,单一裂纹源裂纹自外壁萌生,并在交变载荷的作用下不断扩展,最终发生断裂。

1.6 ANSYS 有限元分析

1.6.1 模型建立及载荷施加

参照图 2 对测温套管在整体管路中的受力情况进行有限元模拟分析^[8]。在 UG 中建立全尺寸的物理模型如图 5 所示,在 ANSYS 中进行网格划分,共有 98 240 个六面体网格,并在结构的危险位置进行网格加密。考虑到结构在 R2.5 倒圆角区域可能受到比较大的弯力,为了避免出现剪切硬化,单元选择 C3D8R,即六面体减缩积分单元。

材料属性:密度 $\rho=7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E=2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比 $\gamma=0.3$ 。

边界条件:在焊缝区域施加 $U_1=U_2=U_3=0$ 的全约束。

热套管的断裂一般是由于不稳定气流冲击热套管表面产生的激振力引起部件的疲劳损伤所致,在一维稳态流场中可以近似计算热电偶套管的压强差为:

$$\rho=3.5 \text{ MPa(管路压降)} \times (40/10899 \text{ (热电偶占比)}) \\ =0.00128 \text{ MPa} \quad (1)$$

此压强差为稳态条件下热电偶套管两边端点的压强差。考虑到热电偶放置位置在流场的端部,并且热电偶中间区域压差小于两个端部差,此估计是比较保守的。

在蒸汽管道中流动的气体冲击热电偶套管的频率并不是固定的,而是以某一段或某几段为主。为了校核强度,可以在频域通过傅里叶变换将气流频率分解到热电偶套管的振动频率上。

$$A=A_0+A_1 \cos(\omega t+\phi)+\dots \quad (2)$$

可以考虑所有稳态压强全部以热电偶的振动频率进行变化即 $A_1=A$,这是一种极端工况,这种考核属于过考核方法。

在热电偶套管伸出管道的范围内单向施加压强 A ,如图 6 所示。

1.6.2 计算结果

有限元分析计算结果如表 3 及图 7 所示。可以看出,由于二阶及高阶动应力下降很快,可以不予考虑,测温套管的一阶动应力为 52.51 MPa,小于 F91 在此服役温度下的许用应力。动应力的极大值出现在 R2.5 的倒圆角处,和断裂位置相吻合。

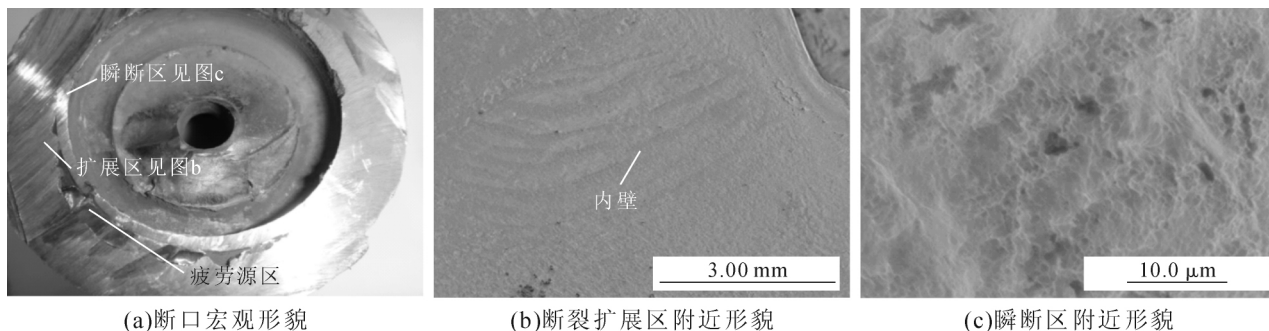


图 4 断口样品的宏观形貌与显微形貌
Fig.4 Macro- and micro- morphology of fracture sample

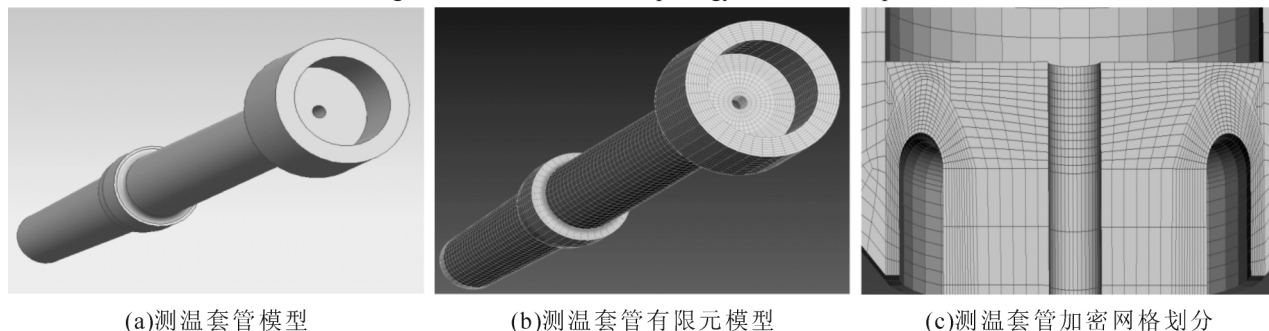


图 5 测温套管及其有限元模型
Fig.5 Measuring temperature casing model and finite element model

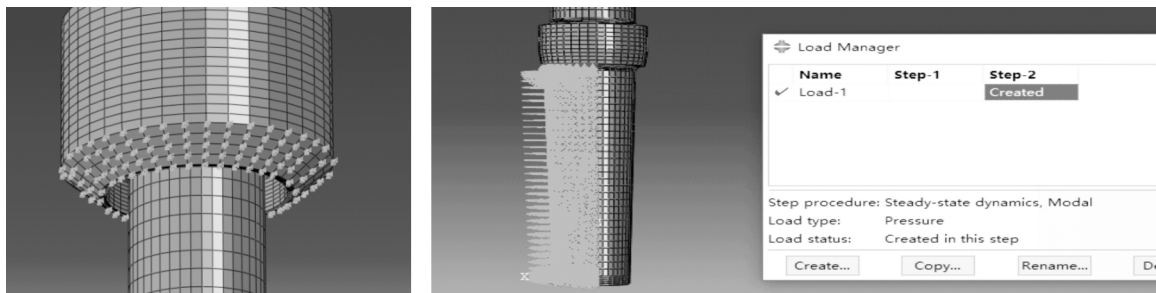


图6 边界条件施加

Fig.6 Application of boundary conditions measurement casing

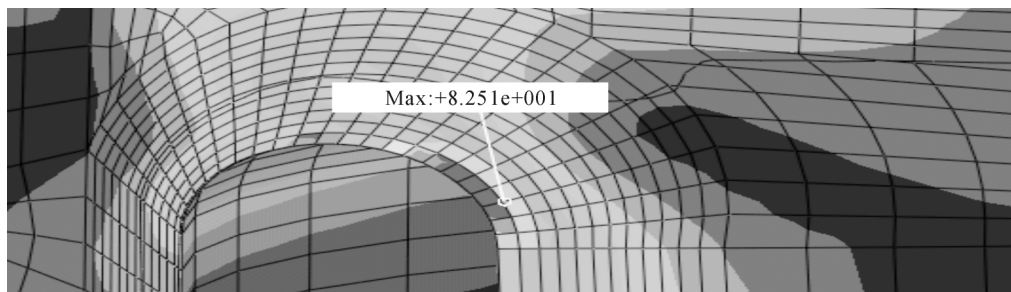


图7 动应力分布图

Fig.7 Dynamic stress distribution

表3 热电偶套管频率及动应力计算结果

Tab.3 Calculation results of frequency and dynamic stress of thermocouple casing

阶数	1	2	3	4
频率 /Hz	250.34	1 512	2 809	3 803
动应力 /MPa	52.51	4.73	2.27e-47	0.328

2 分析与讨论

试验结果表明,断裂的测温套管的材料化学成分、金相组织及硬度均未见异常,测温套管材质合格。

宏观检查发现,测温套管与管道筒体配合凸台处存在明显的反复碰磨痕迹,表明套管与管孔内壁存在多次撞击碰磨。经断口分析,裂纹源位于套管外壁,扩展区断口处存在明显的疲劳辉纹,瞬断区断口为脆性断口。经受力分析可知,套管在运行中受到的动应力小于 F91 材质在该服役温度下的许用应力,动应力的极大值出现在套管的 R2.5 倒角处,与发生断裂的实际位置相吻合。

综上所述,该测温套管配合凸台加工尺寸与管孔内壁开孔大小不符,存在间隙,套管与管孔的配合并非过盈配合,安装后的套管 R2.5 倒圆角处承受因蒸汽流速波动及冲击引起的交变应力,此位置的套管在交变应力作用下萌生疲劳裂纹,并不断扩展,最终导致套管断裂,测温套管的失效类型为疲劳断裂。

3 结论与建议

(1)测温套管的失效类型为疲劳断裂,引起疲

劳断裂的主要原因为测温套管配合凸台加工尺寸与与管孔内壁开孔大小不符,存在间隙,安装后的套管 R2.5 倒圆角处承受因蒸汽流速波动及冲击引起的交变应力,此位置的套管在交变应力作用下萌生疲劳裂纹,并不断扩展,最终导致套管断裂。

(2)建议严格按照设计图纸进行加工套管配合凸台和管道开孔的尺寸,测温套管保证安装后套管与管孔间为过盈配合;必要时可适当增大 R2.5 倒角尺寸及降低该部位的粗糙度。

参考文献:

- [1] 靳峰,宋利,张武能,等.屏式过热器出口集箱热电偶套管断裂原因分析[J].热力发电,2010,39(4):100-101,103.
- [2] 严亮,黎阳,宋明亮.核电厂仪表套管断裂失效特性研究[J].核动力工程,2017,38(S2):167-171.
- [3] 刘尚慈.火力发电厂金属断裂与失效分析[M].北京:水利电力出版社,1992.
- [4] 何家胜,崔好选,朱小明,等.热电偶套管断裂失效分析研究[J].装备制造技术,2007(1):14-16.
- [5] 张国栋,薛飞,王兆希,等.P91钢蠕变—疲劳交互作用下断裂特性研究[J].机械强度,2012,34(6):886-891.
- [6] 牛亚平,方德明.高压调节阀后热电偶套管断裂原因分析[J].理化检验(物理分册),2006(3):137-139,143.
- [7] 钟群鹏,赵子华,张峥.断口学的发展及微观断裂机理研究[J].机械强度,2005(3):358-370.
- [8] 鄢志丹,陈果,许超宇.基于有限元模型的流体管道应力应变特性仿真实验研究[J].实验室研究与探索,2018,37(7):110-113,146.