

DOI: 10.11973/jxgccl202009010

T23、T91、TP347H 钢管长时服役后的显微组织和拉伸性能

郭赓佳¹, 谷树超², 段鹏², 丁宪飞², 王松², 刘宇哲²

(1. 上海漕泾热电有限责任公司, 上海 201507; 2. 上海明华电力科技有限公司, 上海 200090)

摘要: 在服役约 7.8 万 h 的 600 MW 超临界锅炉末级再热器不同位置截取 T23、T91 和 TP347H 钢管试样, 分别进行显微组织和常温、高温拉伸性能分析, 对比研究了显微组织和拉伸性能的劣化程度。结果表明: T23、TP347H 和 T91 钢管试样的组织均呈现明显的老化特征, 晶界处分别析出 M_6C 碳化物、 $M_{23}C_6$ 碳化物和 Laves 相, 显微组织老化级别分别为 4 级、3.5 级和 4 级; T23 钢管试样的常温和高温拉伸性能均呈现严重的劣化倾向, 均不满足标准要求, T91 钢管试样的抗拉强度明显下降, TP347H 钢管试样的拉伸性能则满足标准要求; 在高温状态下, TP347H 钢管试样呈现良好的强度和结构安全性, 但延展性明显降低。

关键词: 末级再热器管; T23 钢; T91 钢; TP347H 钢; 长时服役; 显微组织; 拉伸性能

中图分类号: TG142.1; TG142.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2020)09-0056-06

Microstructures and Tensile Properties of T23, T91, TP347H Steel Tubes after Long-Term Service

GUO Laijia¹, GU Shuchao², DUAN Peng², DING Xianfei², WANG Song², LIU Yuzhe²

(1. Shanghai Caojing Cogeneration Co., Ltd., Shanghai 201507, China;

2. Shanghai Minghua Electric Power Science & Technology Co., Ltd., Shanghai 200090, China)

Abstract: T23, T91 and TP347H steel tube samples were taken at different positions of the final boiler reheater of a 600 MW supercritical boiler in service of about 7.8×10^4 h. Microstructures and tensile properties at room temperature and elevated temperature of these samples were analyzed, and the deterioration degrees of the microstructure and tensile properties were studied and compared. The results show that the microstructures of T23, TP347H, T91 steel tube samples presented obvious degradation characteristics with M_6C carbide, $M_{23}C_6$ carbide and Laves phase precipitated on grain boundaries, and the microstructure degradation grades were grade 4, grade 3.5 and grade 4, respectively. The tensile properties of T23 steel tube samples at room temperature and elevated temperature showed serious deterioration tendency, and did not meet the standard requirements. The tensile strength of T91 steel tube samples decreased significantly. The tensile properties of TP347H steel tube samples met the standard requirements. Under elevated temperature conditions, TP347H steel tube samples had good strength and structural safety, but ductility was significantly reduced.

Key words: final boiler reheater tube; T23 steel; T91 steel; TP347H steel; long-term service; microstructure; tensile property

0 引言

T23 钢、T91 钢和 TP347H 钢因具有优良的综

合性能而广泛应用于壁温不超过 600 °C 的锅炉过热器和再热器管^[1-3]。末级过热器和末级再热器是火电机组锅炉的关键承压部件。在炉内长期高温作用下, 材料会发生显微组织退化, 导致强度降低, 严重时还会导致爆管事故^[4-6], 给火电机组的安全运行带来一定风险。研究受热部件材料在高温长时使用后

收稿日期: 2020-03-24; 修订日期: 2020-07-21

作者简介: 郭赓佳(1978—), 男, 上海人, 高级工程师, 硕士

通信作者: 谷树超

的显微组织及力学性能变化,评估受热面管的材料状态,对掌握锅炉剩余寿命、保障火电机组安全可靠运行具有重要的意义^[7-9]。目前,有关 T23 钢、T91 钢、TP347H 钢等受热面管材料的组织和性能退化研究较多,但是有关相同服役环境下同台机组受热面管材料的对比分析报道较少。T23 钢、T91 钢、TP347H 钢不同的化学成分和显微组织决定了其不同的强化机理,因此在高温服役环境中其显微组织和力学性能的退化也有所差异。分析对比上述 3 种材料在相同服役环境下的显微组织和力学性能变化,对于掌握类似高温材料在服役过程中的性能劣化规律和使用裕度,保障锅炉热管安全运行有着重要的借鉴意义。为此,作者以服役约 7.8 万 h (12 a) 的 600 MW 燃煤锅炉末级再热器 T23 钢管、T91 钢管和 TP347H 钢管为研究对象,分析了 3 种材料的显微组织和拉伸性能,并对比了其在相同服役条件下的性能劣化程度,拟为燃煤发电锅炉关键承压部件的材料状态检验和剩余寿命评估提供基础信息。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验材料取自 600 MW 超临界参数变压运行螺旋管圈直流 π 型锅炉末级再热器管,锅炉型号为 SG-1913/25.4-M967。该锅炉投产于 2007 年 7 月,至 2019 年 3 月累计运行时间 78 215 h (约 7.8 万 h),启停 38 次。在额定工况下,再热器出口压力为 3.94 MPa,出口温度为 569 °C,烟气进口温度为 1 077 °C,烟气出口温度为 973 °C。末级再热器与烟气呈顺流布置,由炉左(固定端)至炉右共设置 33 屏管排,每屏管排共 18 根管子,材料分别为 SA-213

T23 钢、T91 钢和 TP347H 钢,对应钢管规格分别为 $\phi 63.5 \text{ mm} \times 3.76 \text{ mm}$, $\phi 63.5 \text{ mm} \times 3.76 \text{ mm}$, $\phi 63.5 \text{ mm} \times 4.23 \text{ mm}$ 。共截取 9 根末级再热器管,其中 T23 钢管试样 5 根,T91 钢管试样 2 根,TP347H 钢管试样 2 根。末级再热器管屏及具体取样位置如图 1 所示。经检测,同种材料末级再热器间的化学成分基本一致,且均满足 ASME 标准要求,如表 1 所示(所列数据均为各材料试样中的 1 号试样)。

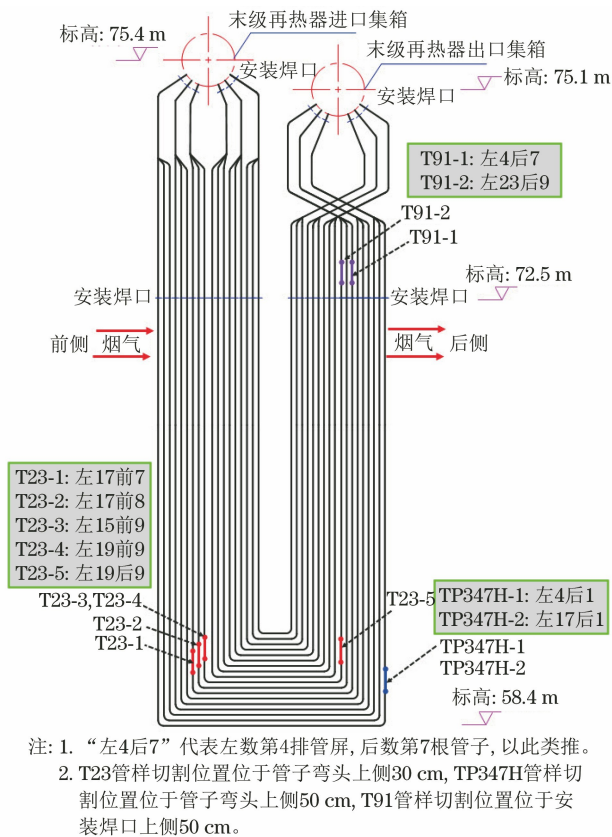


图 1 末级再热器取样示意(侧视图)

Fig. 1 Scheme of sampling from final boiler reheater (side view)

表 1 末级再热器不同钢管试样的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of different steel tube samples from final boiler reheater (mass)

| 牌号 | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | W | V |
|--------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| T23 | 0.08 | 0.27 | 0.49 | 0.01 | 0.003 | 2.18 | 0.17 | 0.11 | 1.54 | 0.23 |
| TP347H | 0.08 | 0.39 | 1.82 | 0.008 | 0.001 | 17.44 | 0.21 | 9.59 | | |
| T91 | 0.11 | 0.25 | 0.44 | 0.006 | 0.003 | 8.97 | 1.00 | 0.13 | | 0.192 |

1.2 试验方法

在不同钢管试样上取样,经打磨、抛光,再分别用体积分数 4% 的硝酸酒精溶液(T23 钢管试样)和氯化铁盐酸水溶液(5 g 三氯化铁+50 mL 盐酸+100 mL 水,T91 和 TP347H 钢管试样)腐蚀后,采用 Axio Observer, D1m 型倒置光学显微镜(OM)和 Quanta FEG450 型高分辨扫描电子显微镜(SEM)

观察显微组织,利用 SEM 自带的能谱仪(EDS)进行微区成分分析。使用线切割技术在各钢管试样基体上截取 0.3 mm 厚的试样,经研磨、冲孔得到直径为 3 mm、厚度在 80~100 μm 的圆片,再利用 MTP-1A 电解双喷仪进行减薄,双喷电压为 45 V,电解液为质量分数 7% 的高氯酸酒精溶液,使用 TECNAI F30 型场发射透射电子显微镜(TEM)观察晶界析

出相的微观形貌。

根据锅炉设计说明书提供的各管段介质温度信息, T23 和 T91 钢管试样高温拉伸试验的温度设定为 525 °C, TP347H 钢管试样的设定为 570 °C。按照 GB/T 228.1—2010 和 GB/T 228.2—2015, 在各钢管试样上机械加工出常温和高温弧形板状拉伸试样, 尺寸如图 2 所示, 利用 C45.305 型微机控制电子

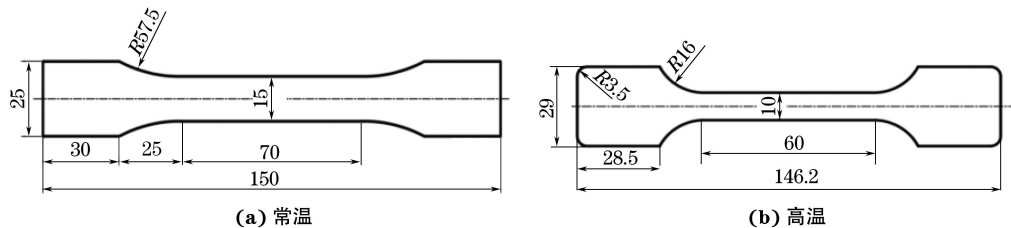


图 2 常温和高温拉伸试样的尺寸

Fig. 2 Size of specimens for room temperature tensile (a) and elevated temperature tensile (b)

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

在相同条件下服役 7.8 万 h 后, 不同位置同种材料试样之间的显微组织差异不大。各钢管试样的典型显微组织如图 3 所示。由图 3 可知: T23 钢管试样的显微组织为铁素体、贝氏体和碳化物, 贝氏体位向明显分散, 晶粒尺寸粗化; 晶界碳化物粒子数量较多, 尺寸较大, 接近 2 μm , 且呈现不同程度的链状分布特征。根据 DL/T 884—2004 中非珠光体钢的老化级

万能试验机进行常温和高温静态拉伸试验。拉伸控制模式为应变速率控制, 应变速率以平行长度估算, 分别为 0.000 25 s^{-1} (屈服之前) 和 0.000 67 s^{-1} (屈服之后)。为减小试验误差, 防止偶然数据的出现, 显微组织分析和力学性能试验均在再热器管迎烟侧取样, 拉伸试验均测试 3 组平行试样并取平均值。

别评定原则, 末级再热器 T23 钢管试样的显微组织老化级别为 4 级。TP347H 钢管试样的显微组织为奥氏体+碳化物, 晶界出现明显的下凹现象, 同时存在粗大第二相。根据 DL/T 1422—2015, 末级再热器 TP347H 钢管试样的显微组织老化级别为 3.5 级。T91 钢管试样的显微组织为马氏体+少量铁素体, 马氏体位向明显分散, 晶界处析出较多碳化物且碳化物严重粗化, 呈不同程度的链状分布。根据 DL/T 884—2004 中非珠光体钢的老化级别评定原则, 末级再热器 T91 钢管试样的显微组织老化级别为 4 级。

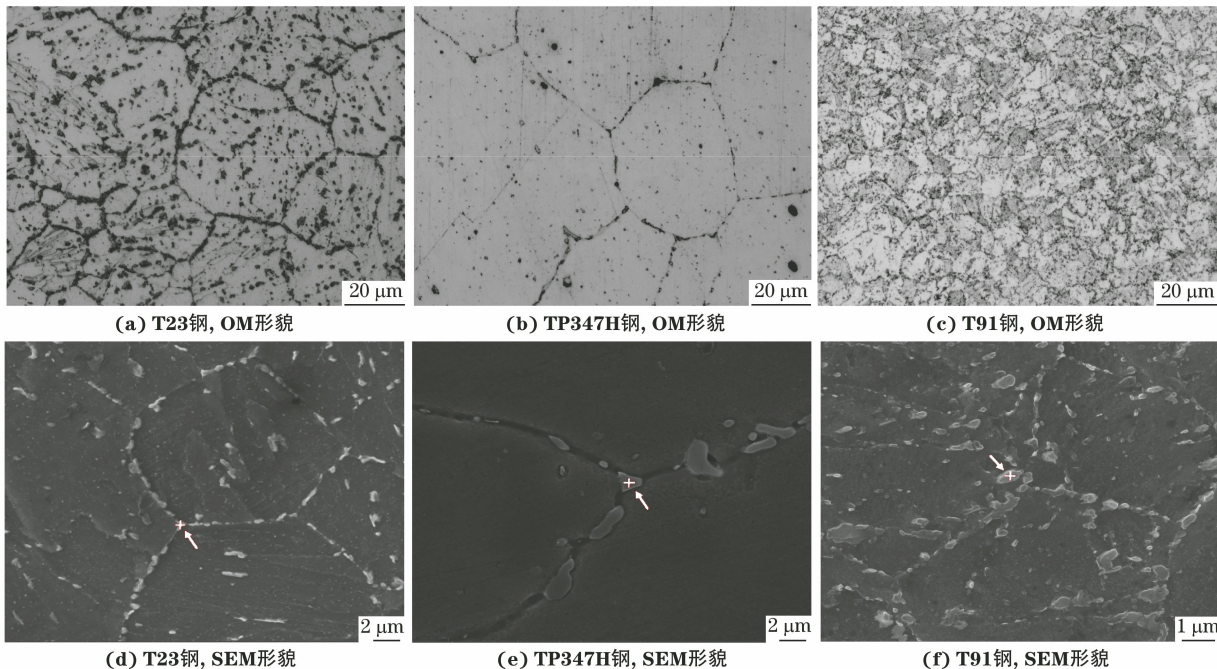


图 3 服役 7.8 万 h 后末级再热器不同钢管试样的典型 OM 和 SEM 形貌

Fig. 3 Typical OM (a—c) and SEM (d—f) morphology of different steel tube samples from final boiler reheater after service for 7.8×10^4 h: (a, d) T23 steel; (b, e) TP347H steel and (c, f) T91 steel

图4为各钢管试样中碳化物(图3中箭头所指位置)的EDS分析结果。由图4(a)可以看出,T23钢管试样中尺寸接近 $2\mu\text{m}$ 的粗大碳化物含有较高含量的铬元素,钨和钼元素的质量分数分别为4.76%和17.01%,明显高于基体中的相应元素含量(表1)。结合图5(a)中碳化物衍射斑点分析可知,该碳化物为富钨 M_6C 相。长时高温服役后,T23钢

中的 $M_{23}C_6$ 型碳化物会发生Ostwald熟化,由富铬和富铁的 $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}C_6$ 相转变为富钨的 M_6C 相^[10-11]。富钨 M_6C 相的析出与长大,说明T23钢管试样的显微组织已发生明显老化。此外,由图5(a)还可以看出,T23钢管试样组织中的位错密度较低,粗大的 M_6C 碳化物主要分布在贝氏体板条或原奥氏体晶界位置。

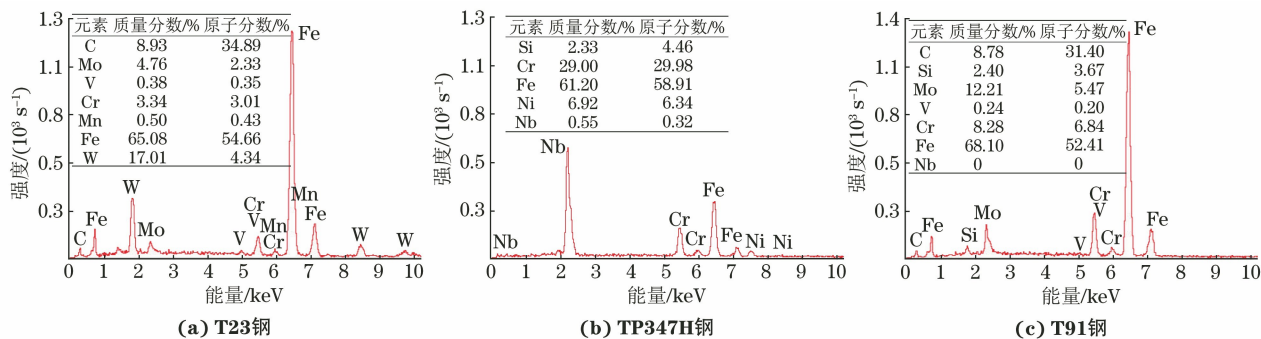


图4 服役7.8万h后末级再热器不同钢管试样中晶界碳化物的EDS谱

Fig.4 EDS patterns of carbides along grain boundaries in different steel tube samples from final boiler reheater after service for 7.8×10^4 h:

(a) T23 steel; (b) TP347H steel and (c) T91 steel

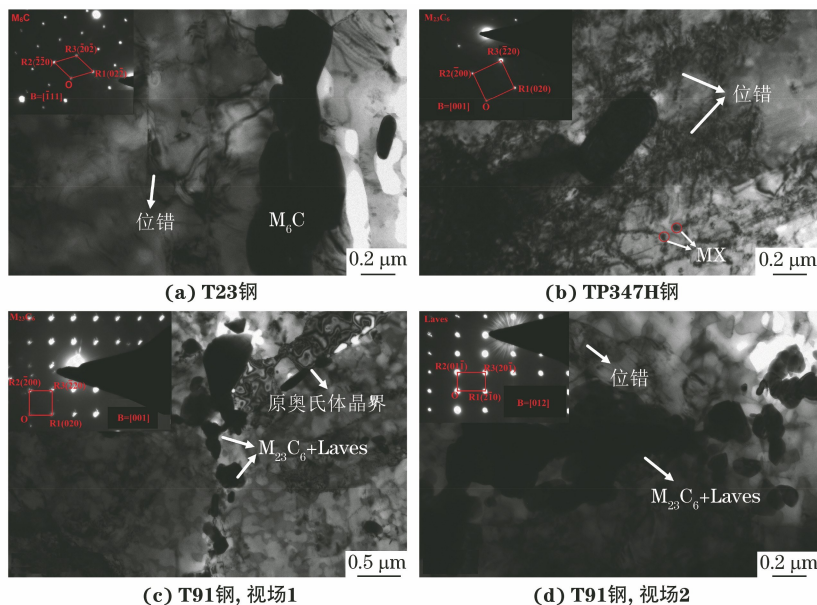


图5 服役7.8万h后末级再热器不同钢管试样的TEM形貌及晶界碳化物衍射斑点

Fig.5 TEM micrographs and diffraction patterns of grain boundary carbides of different steel tube samples from final boiler reheater after

service for 7.8×10^4 h: (a) T23 steel; (b) TP347H steel; (c) T91 steel, view 1 and (d) T91 steel, view 2

由图4(b)可以看出,TP347H钢管试样中的碳化物含有质量分数较高的铬元素,明显高于基体中的铬元素含量(表1)。结合图5(b)中碳化物衍射斑点分析可知,TP347H钢管试样中的粗大碳化物为面心立方(FCC)结构的 $M_{23}C_6$ 相。长时高温服役后,TP347H钢的晶界处会产生富铬的 $M_{23}C_6$ 相^[9,12]。较大 $M_{23}C_6$ 相的出现,表明TP347H钢管试样的组织发生了一定程度的老化^[13]。由图5(b)

还可以看出,TP347H钢管试样组织中仍存在较高密度的位错,位错线附近有较多弥散分布的MX型纳米级沉淀相。这种细小的MX相可以在一些区域形成大量的位错塞积和位错墙,使位错无法运动,从而提高钢的强度^[14-15]。

对于P91/T91钢来说,随服役时间延长,在原奥氏体晶界和马氏体板条界面等位置会析出Laves相,并不断长大。相比于富铬 $M_{23}C_6$ 相,Laves相中

的钼含量明显增加,其化学式可表示为 Fe_2Mo ^[16-17]。由图 4(c)和表 1 分析可知,T91 钢管试样晶界碳化物中的铬含量与基体中的铬含量差别不大,但钼含量明显高于基体中的钼含量。由图 5(d)中碳化物衍射斑点分析可知,该富钼碳化物为密排六方(HCP)结构(晶带轴 $[012]$),这证实了 T91 钢管试样组织中已出现明显长大的 Laves 相,与已有研究结果^[18]相符。另外,T91 钢管试样晶界内可见弥散分布的 MC 型碳化物和周围钉扎的位错结构,相比原始态 T91 钢的板条形貌和高密度位错结构^[19],其马氏体发生明显碎化(呈节状),位错密度降低,组织呈现明显的老化特征^[20]。

各钢管试样在晶界处均析出了粗大的碳化物,原固溶于基体相中的铬、钼等合金元素出现明显的向晶界碳化物偏聚的脱溶现象,其固溶强化作用减弱;同时粗大的碳化物破坏了晶界的连续性,容易在晶界处引起应力集中,产生蠕变孔洞。此外,对于 TP347H 奥氏体不锈钢而言, M_{23}C_6 相在晶界处的不断析出和长大,不仅会造成其韧性的下降,还会在晶界形成贫铬区,从而诱发晶间腐蚀^[21]。

2.2 拉伸性能

ASME SA213 规定:在 20 °C 时,T23 钢、TP347H 钢和 T91 钢的屈服强度下限分别为 400,205,415 MPa;抗拉强度下限分别为 510,515,585 MPa;断后伸长率下限分别为 20%,35%,20%。由图 6 可知:高温服役约 7.8 万 h 后,不同位置 TP347H 钢管试样的常温拉伸性能均满足标准要求,其屈服强度、抗拉强度和断后伸长率均远高于标准下限值;T91-1 号试样的抗拉强度和 T91-2 号试样的伸长率分别低于和接近标准下限值,其他指标均满足标准要求,但接近标准下限值;不同位置 T23 钢管试样的强度指标均低于标准下限值,伸长率满足标准要求。综上可知:高温服役 7.8 万 h 后,T23 钢和 T91 钢的常温拉伸性能发生劣化;TP347H 钢则无论是强度还是塑性,均表现出较宽的使用裕度。

根据 GB/T 5310—2017,采用内插法计算得到 T23 钢、TP347H 钢和 T91 钢在试验温度下的最小屈服强度分别为 314.5,124.2,283.0 MPa。由图 7 可知:所有 T23 钢管试样的高温屈服强度均低于其标准下限值(314.5 MPa);所有 TP347H 和 T91 钢管试

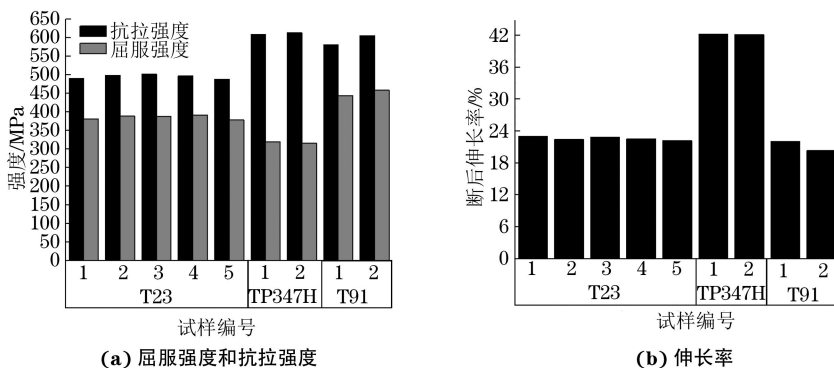


图 6 服役 7.8 万 h 后末级再热器不同钢管试样的室温拉伸性能

Fig. 6 Tensile properties at room temperature of different steel tube samples from final boiler reheater after service for 7.8×10^4 h:

(a) yield strength and tensile strength and (b) elongation

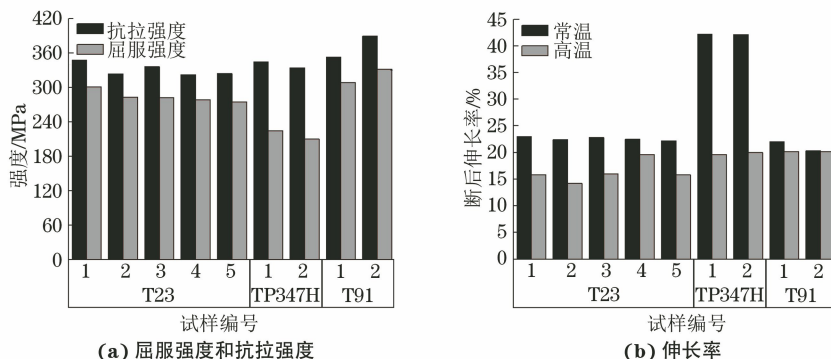


图 7 服役 7.8 万 h 后末级再热器不同钢管试样的高温拉伸性能

Fig. 7 Tensile properties at elevated temperature of different steel tube samples from final boiler reheater after service for 7.8×10^4 h:

(a) yield strength and tensile strength and (b) elongation

样的高温屈服强度均满足标准要求,但 T91 钢管试样的抗拉强度低于 ASME SEC II D SB PT 1—2005 规定的在 525 °C 下的最低抗拉强度(410 MPa)。另外,在高温状态下,TP347H 钢表现出最大的抗拉强度降幅,最小的屈服强度降幅,以及最大的伸长率降幅;服役 7.8 万 h 后 TP347H 钢在高温下的延展性明显降低。

屈强比是指屈服强度与抗拉强度的比值,可表征材料均匀变形的能力,即由塑性变形直至最后断裂过程的变形容量,亦可表征材料抵抗屈服和塑性不稳定变形的能力。屈强比大的钢材可以充分发挥构件的使用性能,制作的结构件可靠性高。但是,屈强比愈小,钢材在受力超过屈服点工作时的可靠性愈大,结构安全性愈高。然而屈强比太小,钢材不能得到有效的利用,又会造成钢材浪费^[22]。由图 8 可知:无论是常温还是高温状态,TP347H 钢管试样的屈强比均最小,说明高温服役 7.8 万 h 后 TP347H 钢仍表现出较高的塑性和结构安全性;在高温状态下,3 种钢管试样的屈强比均有所升高,说明高温状态下的安全性能有所下降,其中 TP347H 钢管试样下降得更快。

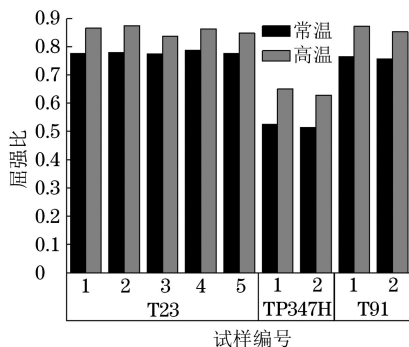


图 8 服役 7.8 万 h 后末级再热器不同钢管试样的室温和高温屈强比

Fig. 8 Yield ratios at room temperature and high temperature of different steel tube samples from final boiler reheater after service for 7.8×10^4 h

3 结论

(1) 服役 7.8 万 h 后,末级再热器不同位置处 T23、TP347H 和 T91 钢管的显微组织均呈现老化特征,3 种材料在晶界处均有较多尺寸粗大的碳化物析出,其中 T23 钢管试样中的碳化物主要为 M_6C ,TP347H 钢管试样中的主要为 $M_{23}C_6$,T91 钢管试样中的主要为 Laves 相;T23、TP347H 和 T91 钢管试样的显微组织老化级别分别为 4 级、3.5 级和 4 级。

(2) 服役 7.8 万 h 后,T23 钢管试样的常温拉伸性能和高温拉伸性能均呈现严重的劣化倾向,且低于标准规定的下限指标;T91 钢管试样的抗拉强度明显下降;TP347H 钢管试样的拉伸性能则满足标准要求。

(3) 在高温服役过程中,相比于 T23 和 T91 钢管试样,TP347H 钢管试样呈现良好的强度和结构安全性,但在高温状态下的断后伸长率明显降低,表明其延展性下降;由于 TP347H 钢管试样的晶界有较多富铬 $M_{23}C_6$ 相析出,因此应注意防范其晶间腐蚀。

参考文献:

- [1] 王学,李夕强,杨超,等.超超临界锅炉水冷壁 T23 接头时效性能[J].动力工程学报,2015,35(4):325-330.
- [2] 陈家伦,于秀清.用于锅炉的耐高温铁素体管材 T91/P91 性能综述[J].锅炉制造,1996(1):15-22.
- [3] 陈勇,梁法光,于在松,等.TP347H 钢 600 及 650 °C 长时持久性能评估[J].热力发电,2020,49(2):127-130.
- [4] 胥杨,陈文觉,马庆谦,等.某亚临界机组 T23 钢屏式过热器爆管原因分析[J].理化检验(物理分册),2019,55(7):506-511.
- [5] 史志刚,马红,崔雄华,等.T23 和 T91 高温过热器短时超温爆管的组织性能分析[J].热力发电,2014,43(9):129-132.
- [6] 刘杰,赵永峰,刘翔,等.600 MW 超临界锅炉 TP347H 高温过热器管爆管的显微分析[J].热加工工艺,2020,49(2):159-162.
- [7] 龙会国,谢国胜,龙毅,等.T23 钢管蒸汽侧氧化层的微观结构及形成机理[J].机械工程材料,2014,38(12):42-45.
- [8] 崔正强,王延峰,赵双群,等.T91 钢管在 600 °C 长期时效后的组织及力学性能[J].机械工程材料,2014,38(12):78-81.
- [9] 王印培,陈进,孙晓明,等.SUS347 不锈钢长期服役后的高温持久强度[J].机械工程材料,2004,28(9):26-28.
- [10] 龚志华,定巍,王宝峰.长时间服役后 T23 钢的组织及析出行为[J].金属热处理,2013,38(4):78-81.
- [11] 于在松,聂铭,侯淑芳,等.HCM2S(T23)钢中的碳化物及其演化规律[J].热力发电,2012,41(9):1-6.
- [12] 李文华,柯安鹏.700 MW 亚临界锅炉三级过热器 TP347HFG 钢失效分析[J].失效分析与预防,14(6):415-419.
- [13] 周颖惠.TP347H 奥氏体耐热钢的时效析出行为及热变形工艺[D].天津:天津大学,2016.
- [14] JUNG J G, PARK J S, KIM J, et al. Carbide precipitation kinetics in austenite of a Nb-Ti-V microalloyed steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(16/17): 5529-5535.
- [15] HA V T, JUNG W S. Creep behavior and microstructure evolution at 750 °C in a new precipitation-strengthened heat-resistant austenitic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 558:103-111.

较软的金属中,推挤较软的金属而形成的。犁沟的出现表明试样的磨损机制主要为磨粒磨损^[12-13]。犁沟中的黑色阴影部分为堆积的片状磨屑,这些磨屑可能是表面材料剥离后留下的硬质氧化物;在较长时间的摩擦力和摩擦热的作用下,磨屑氧化并在 Si_3N_4 磨球的作用下,由白色变成黑色。在摩擦磨损过程中,材料剥离后形成的磨屑会降低试样表面氧化膜的附着力并起到研磨颗粒或固体润滑剂(球形碎屑)的作用,并且在载荷作用下磨屑会产生一个垂直于表面的分力而对表面造成损伤。磨屑不断堆积和最终剥落,造成磨损表面裂纹扩展导致断裂^[14]。

3 结论

(1) 不同温度固溶+时效热处理提高了6082铝合金的硬度;随着固溶温度升高,6082铝合金晶粒细化,硬度增大;当固溶温度为550℃时,晶粒最细小,硬度最高;固溶温度继续升高至570,590℃时,晶粒明显粗化,硬度降低。

(2) 固溶+时效热处理提高了合金的耐磨性能;在较低的固溶温度下,较高载荷下试样的平均摩擦因数略低于较低载荷下的,在较高固溶温度下则相反;550℃固溶+时效后试样在2种载荷下的磨损体积均最小,耐磨性能最好;试样的磨损机制为磨粒磨损,磨损表面均存在微裂纹和犁沟,且高载荷下的微裂纹和犁沟较多。

参考文献:

- [1] 宁爱林,曾苏民. 时效制度对7B04铝合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(6): 922-927.
- [2] 张泽东,刘晓滕,申中宝,等. 固溶和预时效工艺对6016铝

合金汽车用板材力学性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2019, 47(2): 28-32.

- [3] 张福全,王祥,袁武华,等. 固溶时间对7050铝合金组织和性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(12): 11-14.
- [4] 程雪婷,程仁寨. 固溶处理对6082铝合金组织与性能的影响[J]. 中国金属通报, 2019(4): 11-13.
- [5] 孙瑜. 热处理对6082、6063合金组织和性能的影响[D]. 长沙:中南大学, 2012.
- [6] 何立子,张晓博,孙秋霞,等. Cu及热处理制度对Al-Mg-Si系合金晶间腐蚀敏感性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(2): 231-235.
- [7] 张海峰,郑子樵,钟申,等. 双级时效制度对6156铝合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(4): 1025-1032.
- [8] MRÓWKA-NOWOTNIK G, SIENIAWSKI J. Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162: 367-372.
- [9] 王飞,王红. 汽车用6082铝合金热处理工艺研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(16): 245-253.
- [10] 邹永恒,陶虹,徐国明,等. 6082铝合金热处理工艺参数的研究[J]. 金属热处理, 2007, 32(10): 71-76.
- [11] 冉旭,孙宏伟,杜明,等. 固溶处理对6082锻造铝合金控制臂组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(12): 56-61.
- [12] BALAKRISHNAN M, DINAHARAN I, PALANIVEL R, et al. Influence of friction stir processing on microstructure and tensile behavior of AA6061/ Al_3Zr cast aluminum matrix composites[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 38: 148-157.
- [13] 袁兴栋,郭晓斐,杨晓洁. 金属材料磨损原理[M]. 北京:化学工业出版社, 2014.
- [14] 李均明. 铝合金微弧氧化陶瓷层的形成机制及其磨损性能[D]. 西安:西安理工大学, 2008.

(上接第61页)

- [16] SHEN Y Z, LIU H, SHANG Z X, et al. Precipitate phases in normalized and tempered ferritic/martensitic steel P92[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 465: 373-382.
- [17] 张作贵,万海波,王延峰. 长期服役再热器管T91钢的微观组织老化行为研究[J]. 动力工程学报, 2019, 39(6): 498-503.
- [18] 范吉富,董显平,熊伟,等. 超超临界机组锅炉用T91钢蒸汽采样管焊接接头开裂的原因[J]. 机械工程材料, 2016, 40(7): 109-113.
- [19] 车畅,钱公,杨喜胜. 长期服役T91钢的微观组织定量分析及

演化规律[J]. 金属热处理, 2019, 44(7): 97-100.

- [20] 张红军,刘树涛,范长信. 国产P91钢在蠕变过程中微观组织和性能的变化[J]. 中国电力, 2007, 40(7): 12-16.
- [21] PILLONI G, QUADRINI E, SPIGARELLI S. Interpretation of the role of forest dislocations and precipitates in high-temperature creep in a Nb-stabilised austenitic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 279(1/2): 52-60.
- [22] 刘岑,杨帆,刘兵,等. 室温与超低温时奥氏体不锈钢S30408的屈强比[J]. 武汉工程大学学报, 2018, 40(2): 228-232.