

# 激光电弧复合焊 T91 钢接头的高温时效组织与性能

胡连海<sup>1\*</sup>, 刘晓林<sup>1</sup>, 侯德彬<sup>1</sup>, 许昌玲<sup>1</sup>, 赵阳<sup>1</sup>, 付坤<sup>2</sup>, 王长才<sup>2</sup>

<sup>1</sup>石家庄铁道大学河北省交通工程材料重点实验室, 河北 石家庄 050043;

<sup>2</sup>河北省特种设备监督检验研究院, 河北 石家庄 050061

**摘要** 采用激光电弧复合焊技术焊接了 T91 耐热钢, 在 750 °C 下对焊接接头进行了不同时间的高温时效处理, 研究了焊缝、热影响区及母材的组织演化, 并对析出物进行了分析。结果表明, 随着高温时效处理时间的增加, 焊缝中的晶粒逐渐增大, 马氏体板条宽度增加并逐渐碎化为亚晶结构, 析出物逐渐粗化并向晶界或亚晶界聚集, 显微硬度逐渐减小。不同时效处理时间下的焊接接头均断裂于母材。

**关键词** 激光技术; 激光电弧复合焊; T91 耐热钢; 时效; 微观组织; 力学性能

**中图分类号** TG456.7

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201845.0902003

## Microstructures and Properties of Laser Hybrid Welded T91 Steel Joints after High Temperature Aging

Hu Lianhai<sup>1\*</sup>, Liu Xiaolin<sup>1</sup>, Hou Debin<sup>1</sup>, Xu Changling<sup>1</sup>, Zhao Yang<sup>1</sup>,  
Fu Kun<sup>2</sup>, Wang Changcai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hebei Provincial Key Laboratory of Traffic Engineering Materials, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

<sup>2</sup>Hebei Special Equipment Supervision and Inspection Institute, Shijiazhuang, Hebei 050061, China

**Abstract** The T91 heat resistant steels are welded by the laser-arc hybrid welding technique. The high temperature aging treatments of welded joints for different time at 750 °C are conducted and the microstructure evolutions of weld, heat affected zone and base metal are investigated. The corresponding precipitation is also analyzed. The results show that, with the increase of high temperature aging time, the grain size in the weld gradually increases, the width of the martensite lath increases and the martensite laths are gradually broken into subgrain structures. Simultaneously, the precipitation gradually coarsens and gathers to the grain or subgrain boundary and the micro-hardness gradually decreases. After the treatments for different aging time, the fractured positions of all welded joints are within the base metals.

**Key words** laser technique; laser-arc hybrid welding; T91 heat resistant steel; aging; microstructure; mechanical properties

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390; 350.3850

## 1 引 言

超(超)临界火电机组具有环保、高效等优点, 被广泛应用于各个领域。随着机组热效率的提高, 超(超)临界火电机组的材料需要具有更好的抗高温腐蚀性、抗热疲劳性和焊接性<sup>[1-2]</sup>。然而, T91 耐热钢的焊接接头容易出现冷裂纹、热影响区软化、焊接接头

韧性降低等问题, 需要通过控制焊接材料、焊接热输入及采取焊后热处理来提高焊接接头的性能<sup>[3]</sup>。T91 耐热钢的焊接方法主要有钨极氩弧焊(GTAW)和手工电弧焊(SMAW)。采用的焊接方式有两种: 一种是 GTAW 焊打底 + GTAW 焊填充盖面; 另一种是 GTAW 焊打底 + SMAW 焊填充盖面<sup>[4]</sup>。

近年来, 激光电弧复合焊技术被广泛应用于制

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-04-22; 录用日期: 2018-05-07

基金项目: 河北省自然科学基金(E2013210030, E2018210099)、河北省质量技术监督局科技计划(2016ZD29, 2017ZD08)

\* E-mail: lianhai\_hu@stdu.edu.cn

造行业<sup>[5-8]</sup>,其具有热影响区小、软化区小、焊接残余变形及残余应力小的特点,焊接接头的力学性能好<sup>[9-11]</sup>。长期在高温、高压下服役的 T91 耐热钢及其接头组织会随着服役时间的增加而老化,材料的性能明显下降<sup>[12]</sup>。因此,优质、高效的 T91 耐热钢激光电弧复合焊接技术具有重要的应用价值。

本文采用激光电弧复合焊焊接了 T91 耐热钢,将焊接接头在超过服役温度的条件下进行了高温时效处理,研究了焊接接头的组织与性能的变化。

## 2 试验材料与方法

采用 T91 耐热钢作为试验材料,其外径为 64 mm,壁厚为 5 mm;焊丝为 ER90S-B9,直径为 1.2 mm,T91 耐热钢和焊丝的化学成分见表 1。采用美国 IPG/YLS-4000 光纤激光器进行试验,其最大输出功率为 4 kW,激光波长为 1.07 μm,焦点半

表 1 T91 耐热钢和焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of T91 steel and welding wire (mass fraction, %)

Material	C	Cr	Mo	Si	Mn	Nb	Fe	Ni	Al	V
T91 steel	0.09	9.60	1.05	0.20	0.40	0.10	Bal.	0.40	0.35	0.25
Welding wire	0.10	9.00	1.00	0.30	0.50	0.06	Bal.	0.70	-	0.20

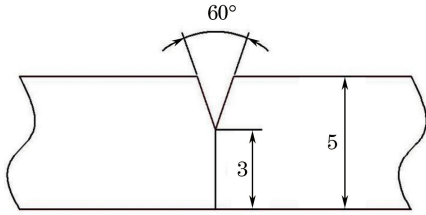


图 1 激光复合焊接头的坡口示意图

Fig. 1 Schematic of groove form of laser hybrid welded joint

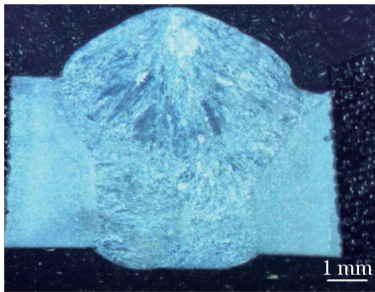


图 2 激光复合焊接头的截面

Fig. 2 Cross section of laser hybrid welded joint

## 3 焊接接头组织分析

### 3.1 金相组织分析

不同时效处理时间下的焊缝区显微组织如图 3 所示。可以看到,原始的焊缝区显微组织主要为板

径为 0.21 mm;采用的焊接设备为山东奥太电气公司的 NB-350 型 MIG 电焊机,采用激光在前、电弧在后的复合方式,焊枪与激光头置于同一平面内,激光头竖直向下,焊枪与水平面的夹角为 45°。激光复合焊接工艺参数:激光功率为 2 kW,离焦量为 -2 mm,焊接电流为 160 A,电弧电压为 21 V,焊接速率为 0.8 m·min<sup>-1</sup>,预热温度为 200 °C,激光与电弧间距为 1 mm,保护气体为 He-Ar 混合气,He、Ar 气体的体积分数分别为 25% 和 75%,气体流量为 25 L·min<sup>-1</sup>。激光复合焊接头的坡口形式如图 1 所示,焊接接头的宏观截面如图 2 所示。在 750 °C 条件下进行焊接接头的高温时效处理,焊缝金属组织的观察位置在焊缝中心,热影响区组织的观察位置在靠近焊缝熔合线处,属于热影响区粗晶区。将电解萃取试验后的析出相进行 X 射线衍射(XRD)分析,以确定析出相的类型。

条马氏体和残余奥氏体,晶界上存在少量尺寸较小的析出物<sup>[12-13]</sup>。时效处理 400 h 的焊缝区的晶粒尺寸明显增大,析出物尺寸开始增大。时效处理 800 h 和 1200 h 的焊缝区的晶粒尺寸进一步增大,晶界及晶粒内部析出物的尺寸也增大,在晶界处有成链状的大量析出物颗粒。

不同时效处理时间下的粗晶区显微组织如图 4 所示。可以看出,随着时效处理时间的增加,粗晶区的晶粒尺寸逐渐增大,析出物分布在晶界和晶内处,析出物的数量先增加后减少,析出物逐渐粗化。这是因为析出物的数量增加后析出物向晶界处运动、聚集并长大,析出物数量减少,但尺寸增大。

不同时效处理时间下的母材区显微组织如图 5 所示。可以看出,随着时效处理时间的增加,母材区的晶粒尺寸逐渐增大,析出物逐渐粗化,析出物的数量先增加再减少,与热影响区粗晶区析出物的变化过程一致。

### 3.2 扫描电镜(SEM)组织分析

不同时效处理时间下焊缝区的 SEM 形貌如图 6 所示。可以看出,原始焊缝区析出物的数量较少且尺寸较小。时效处理 400 h 下焊缝区的晶粒尺寸增大明显,分布在晶界的析出物数量明显增加,尺寸明显增大,有个别析出物颗粒的尺寸较大,已

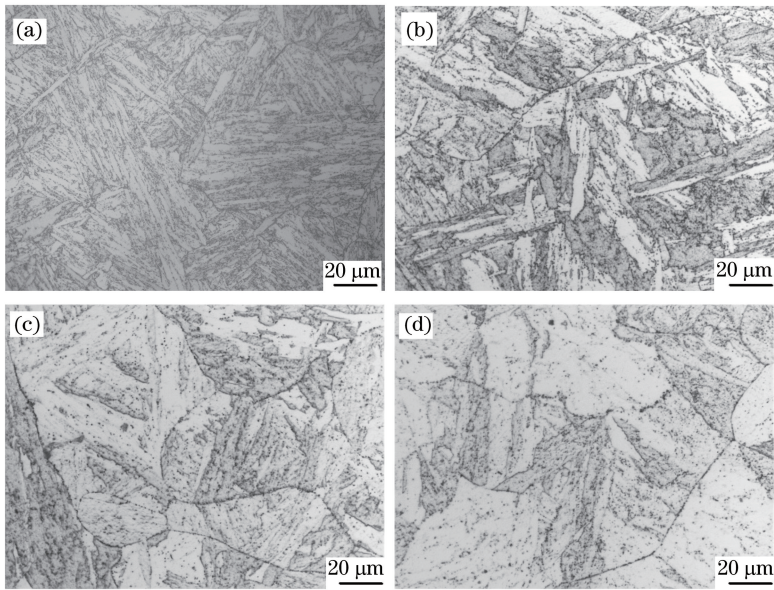


图 3 不同时效处理时间下的焊缝区显微组织。(a) 0 h;(b) 400 h;(c) 800 h;(d) 1200 h  
 Fig. 3 Microstructures of weld regions after treatments for different aging time.  
 (a) 0 h; (b) 400 h; (c) 800 h; (d) 1200 h

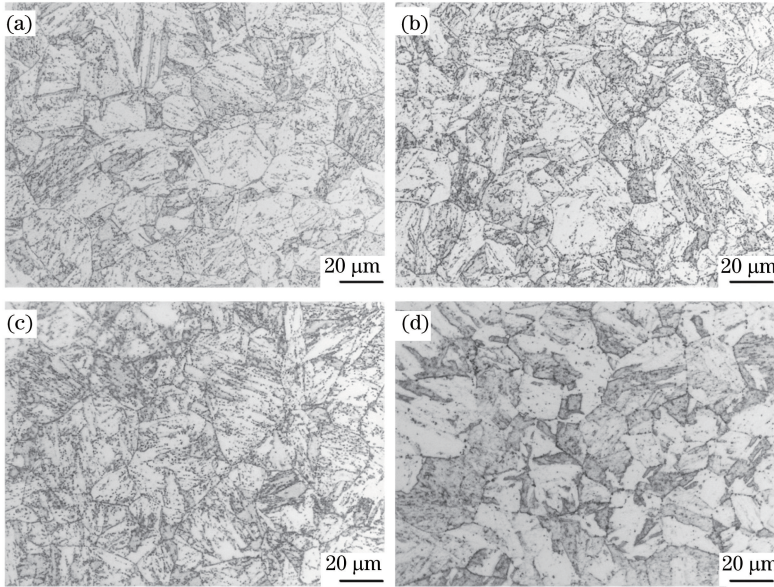


图 4 不同时效处理时间下的粗晶区显微组织。(a) 0 h;(b) 400 h;(c) 800 h;(d) 1200 h  
 Fig. 4 Microstructures of coarse-grained regions after treatments for different aging time.  
 (a) 0 h; (b) 400 h; (c) 800 h; (d) 1200 h

达到  $0.95 \mu\text{m}$ ;在晶粒内部,一部分析出物的尺寸与晶界处析出物的尺寸基本一致。时效处理 800 h 下焊缝区的晶粒尺寸进一步增大,析出物继续向晶界处析出聚集,尺寸明显增大但数量减少,晶内析出物的尺寸相对较小。时效处理 1200 h 下焊缝区的析出物沿晶界和亚晶界析出,尺寸明显增大,但数量有所减少,析出物聚集现象严重。

不同时效处理时间下粗晶区的 SEM 形貌如图

7 所示。可以看到,随着时效处理时间的增加,粗晶区的晶粒尺寸逐渐增大,析出物沿原奥氏体晶界的析出现象逐渐严重,数量先增加再减少,尺寸逐渐增大。当时效处理时间为 400 h 时,粗晶区晶粒内部开始有大量的析出物析出,甚至出现了析出物团聚现象。当时效处理时间为 1200 h 时,晶内出现了尺寸极大的析出相。

不同时效处理时间下的母材区 SEM 形貌如图

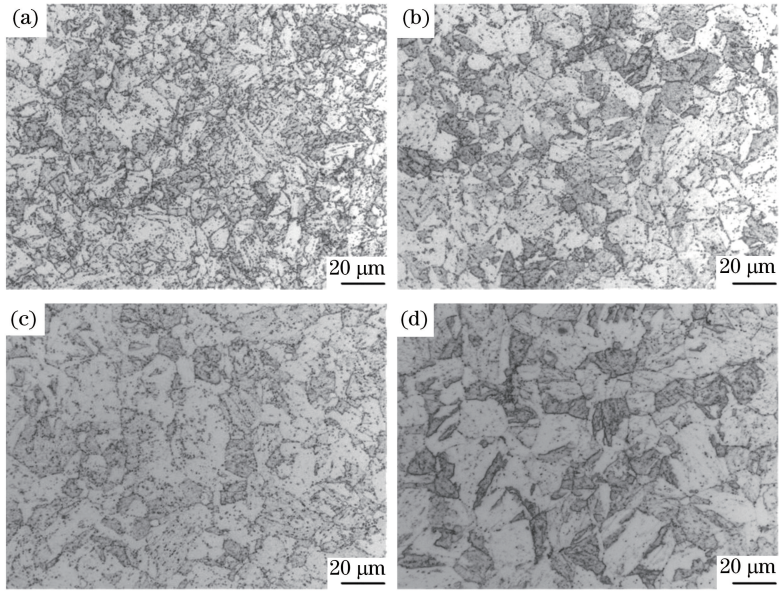


图 5 不同时效处理时间下的母材区显微组织。(a) 0 h;(b) 400 h;(c) 800 h;(d) 1200 h

Fig. 5 Microstructures of base metal regions after treatments for different aging time.

(a) 0 h; (b) 400 h; (c) 800 h; (d) 1200 h

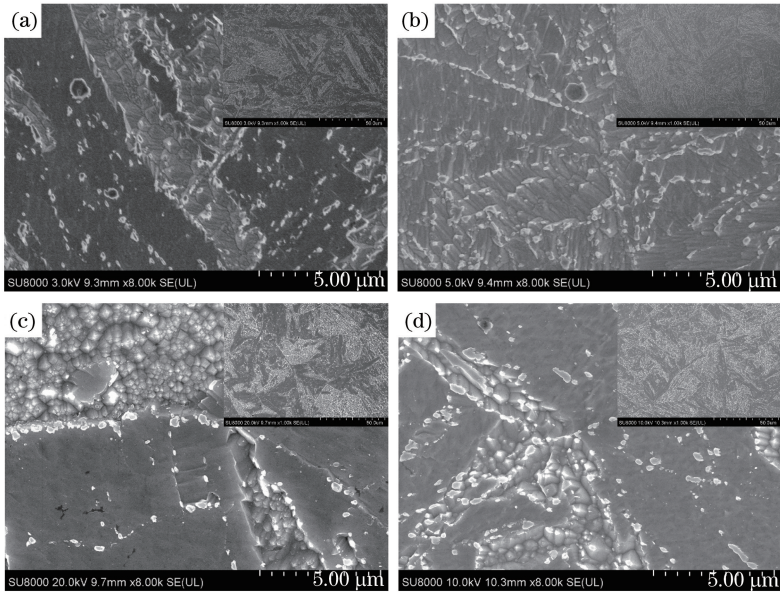


图 6 不同时效处理时间下焊缝区的 SEM 形貌。(a) 0 h;(b) 400 h;(c) 800 h;(d) 1200 h

Fig. 6 SEM images of welds after treatments for different aging time. (a) 0 h; (b) 400 h; (c) 800 h; (d) 1200 h

8 所示。可以看出,随着时效处理时间的增加,母材区晶粒尺寸逐渐增大,析出相尺寸逐渐增大,析出相数量先增加再减少。当时效处理时间为 1200 h 时,大量析出物聚集在晶界处,而晶内的析出物尺寸明显小于原奥氏体晶界和马氏体板条边界上的析出物。

### 3.3 析出相 XRD 分析

当时效处理时间为 1200 h 时,焊接接头析出相的 XRD 分析结果如图 9 所示。可以看出,析出相主

要是  $M_{23}C_6$ 、 $M_7C_3$  和 Laves 相,其中,M 主要为 Fe 和 Cr。从衍射峰强度可以看出, $M_{23}C_6$  相衍射峰强度最高,说明该相含量较多, $M_7C_3$  相衍射峰强度次之,Laves 相衍射峰强度最低。

### 3.4 透射电镜(TEM)组织分析

不同时效处理时间下的焊缝区 TEM 形貌如图 10 所示。可以看出,原始焊缝区的马氏体板条宽度较小,析出物沿晶界少量析出。时效处理 400 h 焊缝区的马氏体板条宽度较大,已达到  $1 \mu m$ ,板条内

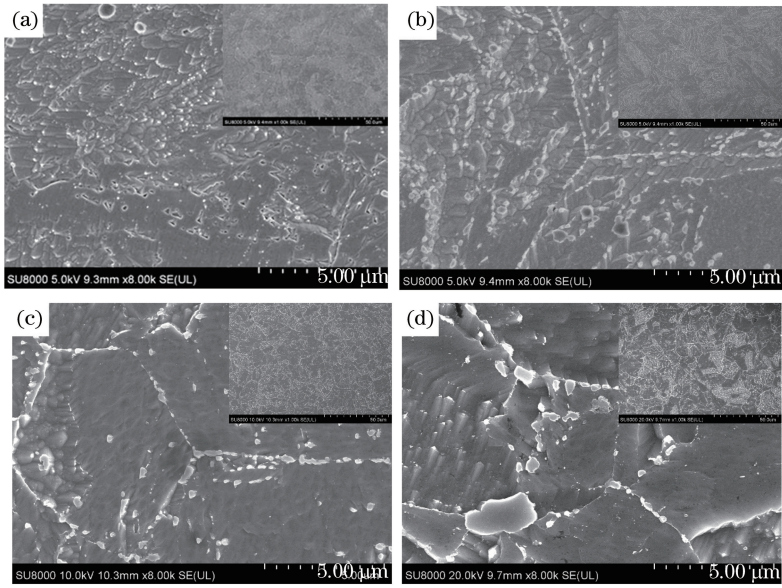


图 7 不同时效处理时间下的粗晶区 SEM 形貌。(a) 0 h; (b) 400 h; (c) 800 h; (d) 1200 h

Fig. 7 SEM images of coarse-grained regions after treatments for different aging time. (a) 0 h; (b) 400 h; (c) 800 h; (d) 1200 h

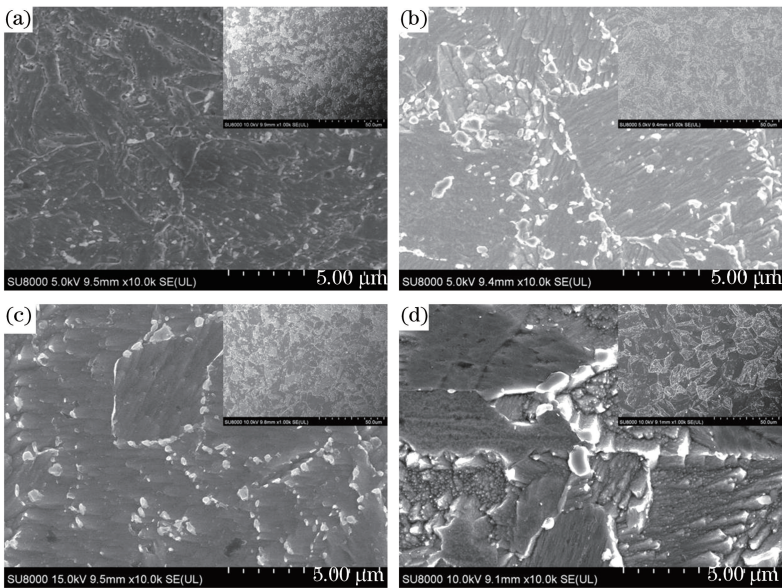


图 8 不同时效处理时间下的母材 SEM 形貌。(a) 0 h; (b) 400 h; (c) 800 h; (d) 1200 h

Fig. 8 SEM images of base metal regions after treatments for different aging time. (a) 0 h; (b) 400 h; (c) 800 h; (d) 1200 h

部出现了碎化的趋势,析出物沿晶界和马氏体边界大量析出。时效处理 800 h 焊缝区的马氏体板条宽度增大且碎化明显,内部已出现大量亚晶结构,析出物沿晶界大量析出,晶粒内部也存在一定数量的析出物。时效处理 1200 h 焊缝区的亚晶数量增加且尺寸明显增大<sup>[14]</sup>,部分亚晶转变为片层状组织,经分析为片层状铁素体,部分亚晶内较干净或仅有零星析出物析出,有些亚晶内不仅有较大尺寸的析出物析出,还有鱼鳞状花纹出现。

不同时效处理时间下的粗晶区 TEM 形貌如

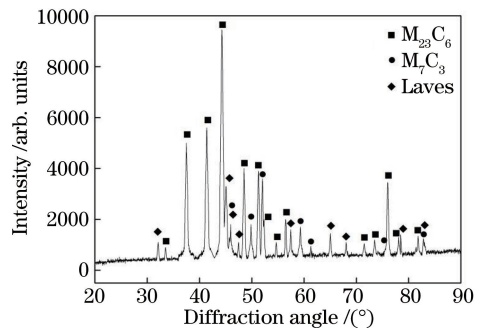


图 9 焊接接头析出相的 XRD 分析结果

Fig. 9 XRD analysis results of precipitated phases of welded joints

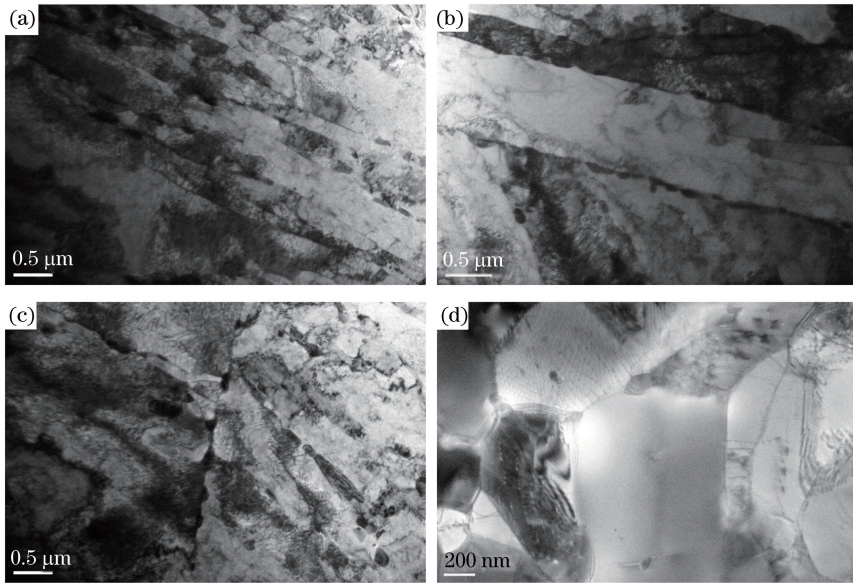


图 10 不同时效处理时间下的焊缝区 TEM 形貌。(a) 0 h;(b) 400 h;(c) 800 h;(d) 1200 h

Fig. 10 TEM images of weld regions after treatments for different aging time. (a) 0 h; (b) 400 h; (c) 800 h; (d) 1200 h

图 11 所示。可以看到,原始粗晶区组织上存在少量析出物,析出物数量较少且尺寸较小。时效处理 400 h 粗晶区的析出物聚集在晶界处,已经形成了链状,析出相尺寸较大,达到  $0.2 \mu\text{m}$  左右。时效处理

800 h 粗晶区的析出物团聚现象比较明显,尺寸增大,较多析出物尺寸已达到  $0.4 \mu\text{m}$  左右。时效处理 1200 h 粗晶区的析出物团聚现象更加严重,析出物数量增加,尺寸增大明显,有的已超过  $0.5 \mu\text{m}$ 。

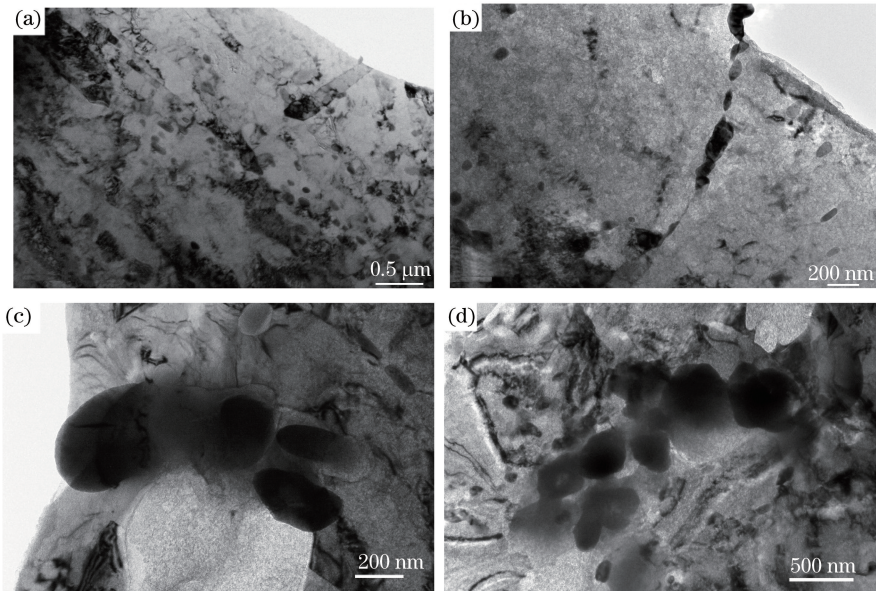


图 11 不同时效处理时间下的粗晶区 TEM 形貌。(a) 0 h;(b) 400 h;(c) 800 h;(d) 1200 h

Fig. 11 TEM images of coarse grained regions after treatments for different aging time.

(a) 0 h; (b) 400 h; (c) 800 h; (d) 1200 h

T91 焊接接头经时效处理后的析出相如图 12 所示,析出相的能谱仪(EDS)分析结果见表 2。结合图 12 和表 2 可以得出,析出相 1 呈圆形,其直径约为  $0.3 \mu\text{m}$ ,金属元素与碳元素的原子数比例约为 23:6,判断该析出相为  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ <sup>[15]</sup>。析出相 2 为圆

形,其直径约为  $1.5 \mu\text{m}$ ,金属元素与碳元素的原子数比例约为 7:3,判断该析出相为  $\text{M}_7\text{C}_3$ 。析出相 3 为长条形,长度约为  $0.3 \mu\text{m}$ ,宽度约为  $0.1 \mu\text{m}$ ,分析其成分发现,析出相 3 中含量较高的金属元素为 Fe、Cr、Mo 等,其中 Cr 的原子数分数较少,仅为

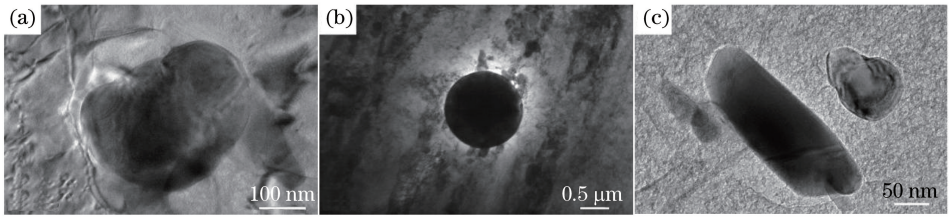


图 12 T91 焊接接头经时效处理后的析出相。(a)析出相 1;(b)析出相 2;(c)析出相 3

Fig. 12 Precipitated phases of T91 welded joints after aging treatment.

(a) Precipitated phase 1; (b) precipitated phase 2; (c) precipitated phase 3

表 2 析出相的 EDS 分析(原子数分数, %)

Table 2 EDS analysis of precipitated phases (atomic fraction, %)

Element	C	Fe	Cr	Mo
Precipitate phase 1	18.7	50.6	23.1	3.8
Precipitate phase 2	32.8	21.3	41.9	1.6
Precipitate phase 3	0.6	57.6	9.2	26.4

9.2%, Fe 的原子数分数为 57.6%, 但 Mo 的原子数分数较高, 为 26.4%, 判断该析出相为 Laves 相。

## 4 焊接接头性能测试与分析

### 4.1 硬度测试

不同时效处理时间下接头的显微硬度变化如图 13 所示。可以看到, 未处理焊缝区的显微硬度大于热影响区, 母材的显微硬度最小; 随着时效处理时间的增加, 各个区域的显微硬度均逐渐减小, 但是与原始接头相比, 经时效处理的接头硬度减小明显。这是因为随着时效处理时间的增加, 晶粒的尺寸增大, 晶界及马氏体板条边界弱化, 达到一定时间后, 马氏体板条碎化形成新的亚晶结构, 位错密度减小, 固溶于基体的 C、Mo、Cr 等合金元素逐渐析出并聚集, 形成粗大析出物并分布于晶界及亚晶界, 沉淀强化和固溶强化作用减弱, 显微硬度逐渐减小。

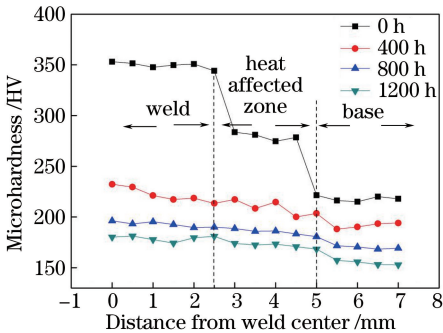


图 13 不同时效处理时间下的接头显微硬度

Fig. 13 Microhardness of welded joints after treatments for different aging time

### 4.2 拉伸测试

不同时效处理时间下的接头在室温和 600 °C 高温的拉伸力学性能分别见表 3、4。可以看到, 焊接接头的抗拉强度随时效处理时间的增加而逐渐减小, 延伸率逐渐增大, 但是均断裂于母材, 说明焊接接头的抗拉强度大于母材, 焊接接头的性能满足使用要求。

表 3 不同时效处理时间下的焊接接头的室温拉伸性能

Table 3 Tensile properties at room temperature of welded joints after treatments for different aging time

Aging time / h	Tensile strength / MPa	Elongation / %	Fracture location
0	695	20.6	Base
400	672	24.2	Base
800	655	25.1	Base
1200	634	25.7	Base

表 4 不同时效处理时间下的焊接接头的高温拉伸性能

Table 4 Tensile properties at high temperature of welded joints after treatments for different aging time

Aging time / h	Tensile strength / MPa	Elongation / %	Fracture location
0	342	21.2	Base
400	326	25.2	Base
800	314	25.7	Base
1200	301	26.1	Base

焊接接头室温和高温拉伸断口的形貌如图 14 所示。可以看到, 室温拉伸断口表面存在许多韧窝, 韧窝的深浅和尺寸各不相同, 呈现出韧性断裂特征; 600 °C 高温拉伸断口形貌为大小不一的韧窝, 部分韧窝深度较大, 说明随着温度的升高, 材料的滑移变形更充分。

T91 钢及焊接接头力学性能的降低主要有三方面原因。首先, 随着时效处理时间的增加, 马氏体板条宽度增大, 其内部位错密度逐渐减小, 位错强化作用减弱。其次, 弥散分布的析出相对基体起到一定的强化作用, 可以在晶界起到钉扎作用, 阻碍板条边界的移动; 但是当析出相的尺寸增大, 逐渐粗化并向

晶界或亚晶界聚集到一定程度时,材料沉淀强化的作用减弱,同时,固溶强化也减弱。最后,时效处理

形成的 Laves 相对 P91 耐热钢的力学性能有不利的影响。

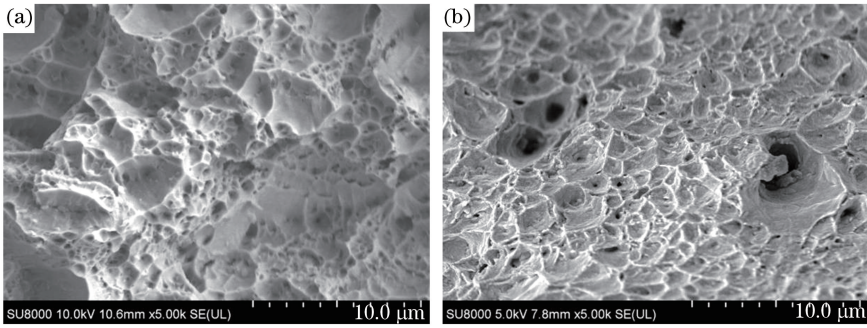


图 14 不同温度下拉伸断口的形貌。(a)室温;(b)高温

Fig. 14 Tensile fracture morphologies at different temperatures. (a) Room temperature; (b) high temperature

## 5 结 论

采用激光电弧复合焊技术焊接了 T91 耐热钢,并对焊接接头进行了高温时效处理,得到以下结论。

- 1) 随着高温时效处理时间的增加,晶粒的尺寸逐渐增大,马氏体板条宽度逐渐增大。
- 2) 当时效处理时间达到一定值后,板条马氏体逐渐碎化、分解为新的亚晶结构,甚至有部分转化为片层状铁素体。
- 3) 焊接接头中的析出相主要有  $M_{23}C_6$ 、 $M_7C_3$  和 Laves 相。
- 4) 随着高温时效处理时间的增加,焊接接头的硬度逐渐减小,焊接接头的室温和高温抗拉强度逐渐减小。

## 参 考 文 献

[1] Hamzah M Z, Ibrahim M L, Chye Q H, *et al.* Evaluation on the hardness and microstructures of T91 reheater tubes after post-weld heat treatment [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2012, 26: 349-354.

[2] Laverde D, Gómez-Acebo T, Castro F. Continuous and cyclic oxidation of T91 ferritic steel under steam [J]. *Corrosion Science*, 2004, 46(3): 613-631.

[3] Zheng K, Xu D S, Zhang X L, *et al.* Welding performance analysis of ultra (ultra) supercritical thermal power units T91 and TP347H [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(6): 53-55, 60, 115-116.  
郑楷, 徐德生, 张雪莲, 等. 超(超)临界火电机组 T91 和 TP347H 焊接性分析[J]. *焊接学报*, 2010, 31(6): 53-55, 60, 115-116.

[4] Wang Z L. Welding procedure of T91/P91 steel[J]. *Welding & Joining*, 2005(12): 29-33.

王则灵. T91/P91 钢的焊接工艺 [J]. *焊接*, 2005 (12): 29-33.

[5] Liu T, Yan F, Liu S, *et al.* Study of narrow gap laser-metal insert gas hybrid welding GH909 alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42 (9): 0903008.  
刘婷, 闫飞, 柳桑, 等. GH909 的窄间隙激光-熔化极气体保护焊复合焊接工艺研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0903008.

[6] Xiao R S, Wu S K. Progress on laser-arc hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35 (11): 1680-1685.  
肖荣诗, 吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展 [J]. *中国激光*, 2008, 35(11): 1680-1685.

[7] Zhao L, Susumu T, Goro A, *et al.* Distribution of wire feeding elements in laser-arc hybrid welds [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0406006.  
赵琳, 塚本进, 荒金吾郎, 等. 激光-电弧复合焊焊缝合金元素分布的研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0406006.

[8] Li M, Zhang W, Hua X M, *et al.* Investigation of plasma and metal transfer dynamic behavior during fiber laser GMAW-P hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0402008.  
李敏, 张旺, 华学明, 等. 光纤激光与 GMAW-P 复合焊接等离子体及熔滴过渡动态特征研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0402008.

[9] Guo P F, Wang X N, Zhu G H, *et al.* Microstructures and properties of X100 pipeline steel joints by fiber laser welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1202003.  
郭鹏飞, 王晓南, 朱国辉, 等. X100 管线钢光纤激光焊接头的显微组织及性能 [J]. *中国激光*, 2017, 44 (12) : 1202003.

[10] Shi P F, Huang J, Tantai F L, *et al.* Microstructures and properties of 27SiMn high-



- strength steel joints by laser-MAG hybrid welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (10): 1002001.
- 史鹏飞, 黄坚, 澹台凡亮, 等. 27SiMn 高强钢激光-MAG 复合焊接接头组织和性能 [J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1002001.
- [11] Moore P L, Howse D S, Wallach E R. Microstructures and properties of laser/arc hybrid welds and autogenous laser welds in pipeline steels [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2004, 9(4): 314-322.
- [12] Song X P, Zhang B, Zhang D W. Microstructure and property of long-time run T91/G102 dissimilar steel welded joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(3): 17-20.
- 宋西平, 张蓓, 张东文. 长时运行 T91/G102 焊接接头组织性能分析 [J]. 焊接学报, 2007, 28(3): 17-20.
- [13] Wojsyk K, Golański G, Jasak J, *et al.* Influence of the annealing time after welding on the mechanical properties of welded joint of T91 steel [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2016, 61 (3): 1079-1084.
- [14] Cui Z Q, Wang Y F, Zhao S Q, *et al.* Microstructure and mechanical properties of T91 steel tube after long-term aging at 600 °C [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014, 38(12): 78-81.
- 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.
- [15] Zavaleta Gutiérrez N, de Cicco H, Marrero J, *et al.* Evolution of precipitated phases during prolonged tempering in a 9% Cr1% MoVNb ferritic-martensitic steel: Influence on creep performance [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(12): 4019-4029.