重大工程装备

# 310S 不锈钢焊接接头组织及力学性能研究

吴厦<sup>1</sup>,任璐<sup>2</sup>,代野<sup>1</sup>,张立业<sup>3</sup>,郭健<sup>3</sup>,詹青青<sup>1</sup>, 刘博<sup>1</sup>,宋凯强<sup>1</sup>,闫慧敏<sup>1</sup>,刘正涛<sup>1</sup>,付扬帆<sup>1</sup>

(1.西南技术工程研究所,重庆 400056; 2.国家国防科技工业局经济技术发展中心,北京 100000; 3.中国船舶集团渤海造船有限公司,辽宁 葫芦岛 125003)

摘要:目的 研究 310S 不锈钢性能焊接接头组织和力学性能。方法 采用手工钨极氩弧焊焊接 310S 不锈钢, 获得 HR3C 焊丝焊接接头。对焊接接头进行室温拉伸试验、高温拉伸试验和高温蠕变性能测试。通过金相 显微镜、扫描电镜、透射电镜及其附带的能谱仪对接头微观组织和断口形貌进行分析。结果 在焊接接头焊 缝金属的晶内,Fe 元素和 Cr 元素变化明显,枝晶边界上 Cr 元素发生富集。310S 不锈钢焊接接头在室温和 850 ℃拉伸条件下,抗拉强度分别为 300、140 MPa。在蠕变温度为 850 ℃、蠕变应力为 50 MPa 条件下,平 均蠕变断裂时间为 26.7 h。焊接接头经高温蠕变试验后,晶界上形成粗大的富铬相,焊缝内纳米相随机分布于 晶界与晶内。结论 310S 不锈钢 HR3C 焊丝接头具有良好的室温力学性能,在 850 ℃下高温拉伸性能、高温蠕 变性能良好,焊缝组织内纳米相阻碍了位错运动,提升了接头焊缝组织的高温拉伸性能、高温蠕变性能。 关键词: 310S 不锈钢;钨极氩弧焊;高温力学性能;高温蠕变;微观组织;纳米相 中图分类号:TG44 文献标志码:A 文章编号: 1672-9242(2024)12-0128-08 DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2024.12.016

## Performance of Thin Plate 310S Stainless Steel Welded Joints

WU Xia<sup>1</sup>, REN Lu<sup>2</sup>, DAI Ye<sup>1</sup>, ZHANG Liye<sup>2</sup>, GUO Jian<sup>2</sup>, ZHAN Qingqing<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>, SONG Kaiqiang<sup>1</sup>, YAN Huimin<sup>1</sup>, LIU Zhengtao<sup>1</sup>, FU Yangfan<sup>1</sup>

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400056, China; 2. Economic and Technological Development Center of SASTIND, Beijing100000, China; 3. China Shipbuilding Industry Corporation Bohai Shipbuilding Co., Ltd., Liaoning Huludao 125003, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the microstructure and mechanical properties of welded joints of thin plate 310S stainless steel. In this paper, manual tungsten inert gas arc welding was applied to weld 310S stainless steel and obtain HR3C welding wire welded joints. Room temperature tensile tests, high temperature tensile tests, and high temperature creep property tests were conducted on the welded joints, and the microstructure and fracture morphology of the joints were analyzed. The changes in Fe and Cr elements within the crystal of the weld metal in the welded joint were significant, and Cr elements were enriched at the dendrite boundary. The tensile strength of 310S stainless steel welded joints at room temperature and 850  $^{\circ}$ C tensile conditions was 300 and 140 MPa respectively; At creep temperature of 850  $^{\circ}$ C and creep stress of 50 MPa, the average creep fracture

收稿日期: 2024-11-19;修订日期: 2024-12-10

Received: 2024-11-19; Revised: 2024-12-10

引文格式: 吴质,任璐,代野,等.3108 不锈钢焊接接头组织及力学性能研究[J]. 装备环境工程,2024,21(12):128-135.

WU Xia, Ren Lu, DAI Ye, et al. Performance of Thin Plate 310S Stainless Steel Welded Joints[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 128-135.

<sup>\*</sup>通信作者 ( Corresponding author )

time was 26.7 hours. After high-temperature creep testing of welded joints, there were coarse chromium rich phases on the grain boundaries, and nano phases randomly distributed at the grain boundaries and within the grains. The 310S stainless steel HR3C welding wire joint has good room temperature mechanical properties, with good high-temperature tensile and creep properties at 850 °C. The nano phase in the weld impedes dislocation movement, improving the high-temperature tensile and creep properties of the joint weld microstructure.

**KEY WORDS:** 310S stainless steel; tungsten inert gas arc welding; high temperature mechanical properties; high temperature creep; microstructure; nano phase

由于某装备高机动、轻量化的发展趋势,其排气 系统采用了轻质薄壁化排气管。由于发动机效率的不 断提高,排气管工作时面临着 700~850 ℃高温和强烈 度振动的工况,在高温振动的环境下,排气管产生蠕 变变形,因此排气管材料面临高温冲击和高温蠕变的 严重挑战。310S 不锈钢为高铬镍的奥氏体不锈钢, 具有优良的高温力学性能、耐腐蚀性能、抗高温蠕变 性能,且焊接性能良好,广泛应用于高于 650 ℃以上 高温环境。如高温炉、发动机排气系统以及特殊高温 部件<sup>[1-6]</sup>,适合于排气管的制造。焊接接头热影响区 经历了复杂的热循环,过热使得晶粒长大,其微观组 织不均匀,该区域成为焊接接头薄弱区域。在排气管 服役期间,焊接接头的高温力学性能、高温蠕变变形 与蠕变断裂时间对其寿命至关重要。

奥氏体不锈钢在高温蠕变过程中,在晶界位置析 出粗大的 σ 相和连续的 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, 使得接头脆化, 降低 接头的力学性能。王永强等<sup>[7]</sup>对 Z3CN20.09M 奥氏体 不锈钢进行了时效处理,通过拉伸试验表明,裂纹萌 生于 σ 相位置处,并不断扩展,σ 相降低了 Z3CN20.09M 奥氏体不锈钢的韧性。彭志方等<sup>[8]</sup>研究 了晶界碳化物  $M_{23}C_6$  相参量与脆化的关系, 粗化的晶 界 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>相是导致脆化的原因。候本睿等<sup>[9]</sup>对 HR3C 奥氏体不锈钢进行了短期时效,随着保温温度的升高 与时间的增加, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>相数量增加, 但尺寸变化不大, 粗大的碳化物造成奥氏体晶界贫铬,导致晶间腐蚀, 同时粗大碳化物导致晶界强化减弱。Wang 等<sup>[10]</sup>研究 发现,奥氏体不锈钢在高温下析出粗大 $\sigma$ 相与 $M_{23}C_6$ , 组织稳定性下降,材料高温性能与耐蚀性能变差。姜 云禄等<sup>[11]</sup>研究了 6.8 mm 厚奥氏体不锈钢板材焊接接 头的高温蠕变性能,在热影响区内,大尺寸 M23C6 沿晶界析出长大,弱化了晶界强度,成为蠕变孔洞形核位置,降低了材料的高温力学性能。在奥氏体不锈钢中添加 Nb、Ti等元素,形成强碳化物,可有效抑制 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>的析出。Pardo等<sup>[12]</sup>研究了 Ti 元素对 AISI 316Ti 奥氏体不锈钢富铬碳化物析出的影响,由于TiC的析出以及 Mo元素进一步增强了 TiC 的稳定性,进而减小了富铬相的析出。张旭等<sup>[13-14]</sup>采用钨极氩弧堆焊焊接了 16 mm 厚的 310S 不锈钢,并研究了 Nb 元素对焊缝金属高温力学性能的影响,Nb 元素的固溶强化与析出强化作用,提升了焊接接头的强度。温冬辉等<sup>[15]</sup>研究了强碳化物形成元素 M (M=Nb、Ti、Ta 和 Zr)对 310S 奥氏体不锈钢析出相行为的影响,强碳化物 MC 的优先析出,可减少 C<sub>23</sub>C<sub>6</sub>析出量,提升了组织的稳定性。

从以上研究可以看出,针对 2 mm 厚的薄板 310S 不锈钢焊接接头在 850 ℃下的拉伸性能、蠕变 性能、组织演变研究较少。因此,本文采用添加有 Nb 元素和 Cu 元素的 HR3C 焊丝作为填充焊丝, 对 2 mm 厚的 310S 不锈钢进行手工钨极氩弧焊, 研究焊接接头的高温性能与微观组织,分析焊接 接头在高温和应力作用下的力学性能、微观组织 和失效机理。

# 1 试验

试验焊接用板材为 310S 不锈钢,尺寸为 200 mm× 80 mm×2 mm,焊丝直径为 2 mm,为添加有 Cu 元素 和 Nb 元素的 HR3C 焊丝,母材成分与焊丝成分见表 1。焊接时采用 WS-250 直流 TIG 焊机,保护气为氩 气,气体流量为 15 L/min,焊接电流为 20~30 A。

表 1 母材与焊丝主要化学成分(质量分数,%)

| Tab. 1 Main chemical composition of base metal and weiding wife (wt.%) |      |      |      |       |       |       |      |      |      |     |    |
|--|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-----|----|
| 材料牌号   | С    | Si   | Mn   | Р     | S     | Cr    | Mo   | Ni   | Cu   | Nb  | Fe |
| 母材   | 0.05 | 0.94 | 1.24 | 0.015 | 0.005 | 25.11 | 0.92 | 20.8 | _    | _   | 余量 |
| HR3C 焊丝  | 0.04 | 0.28 | 1.55 | 0.011 | 0.003 | 27.4  | 0.84 | 19.9 | 2.24 | 0.4 | 余量 |

拉伸试样如图 la 所示,参照 GB/T 228.1—2021, 线切割试样时,焊缝位于试样中部,采用万能试验机 对焊接接头进行拉伸试验。高温试样如图 lb 所示, 采用电子式高温蠕变持久试验机对焊接接头进行高 温拉伸试验和蠕变性能测试,高温拉伸时的温度为 850 ℃,高温蠕变时的蠕变温度为 850 ℃,蠕变应力 为 50 MPa。垂直于焊缝截取 25 mm×10 mm 的金相试 样,包含焊缝区(Weld Zone,WZ)和母材区(Base Zone, BZ)。采用由粗至细的砂纸对试样截面进行打 磨,并采用金刚石抛光膏进行抛光处理。待试样粗糙 度Ra低于0.02 µm后,通过FeCl<sub>3</sub>溶液进行腐蚀,FeCl<sub>3</sub> 溶液按照FeCl<sub>3</sub>:HCl:H<sub>2</sub>O 质量比为 25:2:50 进 行配比,腐蚀时间为 25~30 s。冲洗干净并吹干后, 采用 Observer.Alm 金相显微镜(Optical Microscope, OM)观察金相组织。采用 FEI Quanta 250F 场发射环 境扫描电镜(Scanning Electron Microscopy, SEM) 对焊接接头和断口进行微观形貌分析,并利用其附带的 EDS 能谱分析仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)分析元素和成分。采用 FEI F20 透射电镜(Transmission Electron Microscopy, TEM) 对焊接接头内晶界、晶内析出相进行分析,利用 EDX (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDX)对晶界、晶内元素进行半定量测试,初步推断析出相物质组成。



图 1 试样尺寸

Fig.1 Specimen size: a) tensile test specimen; b) high temperature tensile specimen and high temperature creep specimen

# 2 结果与讨论

## 2.1 焊缝形貌

焊接接头的微观组织形貌如图 2 所示。焊接接头可分为焊缝区、热影响区(Heat Affected Zone, HAZ) 以及母材区。由于焊丝成分与母材成分相似,两者铬 当量和镍当量(母材:铬当量为 27.3%,镍当量为 22.9%; 焊丝: 铬当量为 28.9%, 镍当量为 21.9%) 相近,结合不锈钢舍弗勒组织图, 焊缝组织由析出的 铁素体和为奥氏体基体组成<sup>[16]</sup>。焊缝中心位置温度梯 度小,发生自由形核, 形成了较为细小的中心等轴晶 区, 而在靠近熔合线位置, 温度梯大, 受到冷却时热 流方向的影响, 晶粒具有方向性, 在热影响区的晶粒 发生了明显的长大。



c 熔合线线附近

d 母材区



Fig.2 Microstructure and morphology of welded joints: a) central area of WZ; b) edge position of WZ; c) near the fusion line; d) BZ

焊缝熔合线附近元素分布情况如图 3a 所示,图 中黑色箭头为扫描方向。在母材区内,元素波动小, 表明元素分布较为均匀;在焊缝区内,Fe 元素与 Cr 元素变化明显,这是由于凝固时元素来不及扩散而发 生了偏析,导致 Fe 元素与 Cr 元素分布存不均。焊 缝内局部元素分布情况如图 3b 所示。扫描时经过 了1个枝晶间的距离,在枝晶边界上,Fe 与 Cr 元 素的变化均比较明显,Fe 元素含量降低,Cr 元素 含量增加。焊缝凝固时,在晶界位置发生了局部 Cr 元素富集。



b 焊缝内局部

图 3 元素分布情况 Fig.3 Description of distribution: a) near the weld fusion line;b) local elements in WZ

# 2.2 室温拉伸性能与高温拉伸性能

接头在室温下的拉伸力学性能如图 4a 所示。试验结果表明,接头和母材的平均抗拉强度分别为 300、 315 MPa,接头的强度系数(强度系数=接头抗拉强 度/母材抗拉强度)为母材的 95%。接头在 850 ℃下 的高温拉伸力学性能如图 4b 所示。接头和母材的平 均抗拉强度分别为 140、146 MPa,接头的强度系数 为 96%。在室温与 850 ℃下,焊接接头的力学性能降 低,接头均断裂在热影响区。这是由于焊接带来的热 输入导致热影响区晶粒长大,组织结构不均匀,降低 了接头强度,成为失效的薄弱区域<sup>[4]</sup>。

接头的断口形貌如图 5 所示,断口位置位于热影 响区。从宏观形貌上来看,室温拉伸断口产生明显的 颈缩现象;从微观形貌上来看,断口均由大量的韧窝 和撕裂棱组成,为典型的韧性断裂形式。850 ℃下接 头拉伸断口断面收缩率小,韧窝浅,有空洞缺陷产生。 晶界析出相导致晶界成为变形的薄弱位置,成为微空 洞形核位置,并逐渐长大、扩展,加速了裂纹扩展, 使得韧窝变浅,接头提前发生断裂失效,宏观上接头 塑性降低。

## 2.3 高温蠕变性能

### 2.3.1 蠕变断裂时间

接头与母材高温蠕变断裂时间的比较如图 6 所示。在蠕变温度 850 ℃、蠕变应力 50 MPa 条件下, 接头和母材的平均蠕变断裂时间分别为 26.7、27.5 h。 HR3C 接头与母材的蠕变断裂时间接近,其在高温蠕 变条件下断裂主要发生在热影响区。这是由于热影响 区是接头薄弱区域,此区域优先失效,这也与接头的 室温和高温拉伸结果一致。

#### 2.3.2 蠕变后组织

接头焊缝高温蠕变前后晶界析出相情况如图 7 所示。由图 7a 可知,蠕变前,在晶界位置未观察到 明显的析出相。由图 7b 可知,在晶界位置处产生了



#### 图 4 接头在室温、高温下的拉伸力学性能

Fig.4 Elongated mechanical properties of welded joints at room temperature and high temperature: a) room temperature; b) 850  $^\circ\!\!C$ 



b 微观形貌

图 5 接头断口形貌 Fig.5 Morphology of welded joint fracture: a) macroscopic morphology; b) microstructure



图 6 接头与母材高温蠕变断裂时间比较 Fig.6 Comparison of high temperature creep fracture time between welded joints and base metal

较大的析出相。对析出相进行 EDS 元素分析发现, 析出相为富 Cr 相,位置 3 的 Cr 元素含量远高于晶内 位置 2 以及高温蠕变前位置 1 的 Cr 元素含量,而 Fe 元素和 Ni 元素含量低于位置 1 与位置 2。

母材和接头焊缝高温蠕变后晶界元素分布情况 如图 8 所示。在高温蠕变过程中,高温使得溶质原子 加速扩散,因此在母材和接头焊缝内沿晶界位置均析 出了富 Cr 相,发生了偏析。从尺寸上来看,析出的 富 Cr 相较母材小。在焊缝内,Cu 元素与 Nb 元素分 布没有明显聚集,纳米 NbC 相与纳米 Cu 相<sup>[17]</sup>随机分 布于晶内、晶界位置。由于蠕变空洞在母材金属晶界 位置的碳化物附近萌生,随着空洞的长大、聚集,形 成裂纹。由于在晶内 Nb 与 C 形成了强碳化物<sup>[14-15,18]</sup>, 消耗了 C 原子,高温蠕变时,减缓了晶界聚集形成的 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>长大<sup>[19-20]</sup>,因此接头相较于母材,其碳化物粗



图 7 接头焊缝高温蠕变前后焊缝内晶界析出相情况





b 接头焊缝

图 8 高温蠕变后晶界元素分布情况 Fig.8 Distribution of grain boundary elements after creep: a) BZ; b) jointwelds

化情况较弱,高温变形性能更好,这也符合接头经高 温蠕变后断裂在热影响区的结果。

接头焊缝高温蠕变后晶内纳米级析出相分布情况如图 9 所示。其中,图 9a 为纳米相,其在晶内随机分布,弥散强化了焊缝组织;图 10b 为纳米相与位

错之间交互关系,其中L为正在通过攀移越过第二相 的位错,M为位错结,N为纳米相。根据位错强化理 论,焊缝区的纳米相通过阻碍位错运动,使得位错发 生攀移,形成了对焊缝组织的强化作用,从而提高了 焊缝组织的高温蠕变性能。



a 纳米相

b 纳米MX相与位错之间交互关系



# 3 结论

1)310S 不锈钢焊接接头在室温和 850 ℃下的平 均抗拉强度分别为 300、140 MPa,分别达到了可达 母材的 95%、96%。热影响区晶粒长大,组织结构不 均匀,接头强度降低,成为失效的薄弱区域。

2)焊接接头的高温蠕变性能良好,在蠕变温度 850 ℃、蠕变应力 50 MPa 条件下,平均蠕变断裂时 间为 26.7 h。

3)焊缝金属凝固时,形成了纳米 NbC 相与纳米 Cu 相。纳米 NbC 相为强碳化合物,高温蠕变时减缓 了晶界上的 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>长大。纳米相在焊缝中弥散分布, 通过阻碍位错运动,使得位错发生攀移,强化了焊缝 组织高温蠕变性能。

#### 参考文献:

高圣伦,孙彬,程磊,等. 排气系统用不锈钢在汽车尾
 气环境下的高温氧化行为[J]. 材料导报, 2023, 37(24):
 223-229.

GAO S L, SUN B, CHENG L, et al. High-Temperature Oxidation Behavior of Stainless Steel for Exhaust System under Automotive Exhaust Environment[J]. Materials Reports, 2023, 37(24): 223-229.

- [2] LO K H, SHEK C H, LAI J K L. Recent Developments in Stainless Steels[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2009, 65(4/5/6): 39-104.
- [3] 艾峥嵘, 于凯, 吴红艳, 等. 超低温轧制 304 奥氏体不

锈钢马氏体逆相变及组织表征[J]. 精密成形工程, 2023, 15(12): 12-18.

AI Z R, YU K, WU H Y, et al. Martensite Reverse Transformation and Microstructure Characterization of 304 Austenite Stainless Steel during Cryogenic Rolling[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(12): 12-18.

- [4] JIANG Y L, KAN Y, CHEN H N. Heterogeneous Microstructure-Induced Creep Failure Responses in Various Sub-Zones of Modified 310S Welded Joints[J]. Metals, 2022, 12(1): 116.
- [5] 谢佼,胡喆.国内首座高水平放射性废液玻璃固化设施投运[J].电子产品可靠性与环境试验,2021,39(5):
   60.

XIE J, HU Z. The First Domestic High-Level Radioactive Waste Liquid Glass Curing Facility Was Put into Operation[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2021, 39(5): 60.

[6] 胡兴, 彭昭成, 冯广杰, 等. SUS310S 不锈钢局部真空 电子束焊接接头残余应力及变形研究[J]. 机械工程学 报, 2020, 56(21): 38-47.
HU X, PENG Z C, FENG G J, et al. Numerical Simulation of Residual Stress and Deformation of SUS310S Stainless Steel Local Vacuum Electron Beam Welded Joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(21): 38-47.

 [7] 王永强,杨滨,李娜,等.σ相在核电一回路主管道不锈 钢中的脆化机理[J].金属学报,2016,52(1):17-24.
 WANG Y Q, YANG B, LI N, et al. EMBRITTLEMENT OF σ PHASE IN STAINLESS STEEL FOR PRIMARY COOLANT PIPES OF NUCLEAR POWER PLANT[J]. ActaMetallurgicaSinica, 2016, 52(1): 17-24.

- [8] 彭志方,任文,杨超,等.HR3C 钢运行过热器管的脆 化与晶界 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>相参量演化的关系[J].金属学报,2015, 51(11): 1325-1332.
  PENG Z F, REN W, YANG C, et al. Relationship between the Evolution of Phase Parameters of Grain Boundary M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> and Embrittlement of HR3C super-Heater Tubes in Service[J]. ActaMetallurgicaSinica, 2015, 51(11): 1325-
- 1332.
  [9] 侯本睿,赵新宝,杜双明,等. 短期时效处理对 HR3C 合金显微组织和显微硬度的影响[J].热加工工艺, 2016, 45(18): 245-248.
  HOU B R, ZHAO X B, DU S M, et al. Effect of Short-Aging Treatment on Microstructure and Micro-Hardness of HR3C Alloy[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(18): 245-248.
- [10] WANG Z N, LIANG T, XING W W, et al. Σ-Phase Precipitation Mechanism of 15Cr–15Ni Titanium-Modified Austenitic Stainless Steel during Long-Term Thermal Exposure[J]. ActaMetallurgicaSinica (English Letters), 2018, 31(3): 281-289.
- [11] 姜云禄,陈静,阚盈,等. 310S 不锈钢焊接接头高温力 学性能及组织演变[J]. 机械工程学报, 2024, 60(12): 250-258.
  JIANG Y L, CHEN J, KAN Y, et al. Mechanical Properties and Microstructure Evolution of 310S Austenitic Stainless Steel Welded Joint at High Temperature[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(12): 250-258.
- [12] PARDO A, MERINO M C, COY A E, et al. Influence of Ti, C and N Concentration on the Intergranular Corrosion Behaviour of AISI 316Ti and 321 Stainless Steels[J]. ActaMaterialia, 2007, 55(7): 2239-2251.
- [13] 张旭. 微合金元素铌对奥氏体基焊缝金属组织与性能 的影响[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
   ZHANG X. Effect of Microalloying Element Niobium on Microstructure and Properties of Austenite-Based Weld

Metal[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.

- [14] ZHANG X, LI D Z, LI Y Y, et al. The Influence of Niobium on the Plastic Deformation Behaviors of 310s Austenitic Stainless Steel Weld Metals at Different Temperatures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 743: 648-655.
- [15] 温冬辉, 吕阳, 李震, 等. 强碳化物形成元素与碳的配 比关系和稳定化处理对 310S 奥氏体不锈钢析出相行为 的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(18): 3101-3106.
  WEN D H, LYU Y, LI Z, et al. Effects of Ratios of Strong Carbide-Forming Elements to C and Stabilization Treatment on Precipitation Behavior of 310S Austenitic Stainless Steel[J]. Materials Reports, 2019, 33(18): 3101-3106.
- [16] WANG X N, CHEN X M, SUN Q, et al. Formation Mechanism of Δ-Ferrite and Metallurgy Reaction in Molten Pool during Press-Hardened Steel Laser Welding[J]. Materials Letters, 2017, 206: 143-145.
- [17] 张宇. 新型复合强化奥氏体耐热钢及焊接接头蠕变行 为与机制[D]. 天津: 天津大学, 2020.
   ZHANG Y. Creep Behavior and Mechanism of New Composite Strengthened Austenitic Heat-Resistant Steel and Welded Joint[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [18] 温冬辉, 吕阳, 李震, 等. Nb/Ti/Zr/W 对 310S 奥氏体不 锈钢析出相行为和力学性能的影响[J]. 材料工程, 2019, 47(9): 61-71.
  WEN D H, LYU Y, LI Z, et al. Effect of Nb/Ti/Zr/W on Precipitation Behavior and Mechanical Property of 310S Austenitic Stainless Steels[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(9): 61-71.
- [19] SHALCHI AMIRKHIZ B, XU S, SCOTT C. Microstructural Assessment of 310S Stainless Steel during Creep at 800 °C[J]. Materialia, 2019, 6: 100330.
- [20] SANDSTRÖM R, FAROOQ M, LUNDBERG M. Precipitation during Long Time Ageing in the Austenitic Stainless Steel 310[J]. Materials at High Temperatures, 2012, 29(1): 8-16.