



Investigation on the Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Weld Joint for Inconel 617 Alloy and 12Cr Steel

Wang Peng^{1,*}, Xu Huali², Liu Xia¹

¹Shanghai Turbine Plant of Shanghai Electric Power Generation Equipment Co. Ltd., Shanghai, China

²School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China

Email address:

wangpeng@shanghai-electric.com (Wang Peng)

*Corresponding author

To cite this article:

Wang Peng, Xu Huali, Liu Xia. Investigation on the Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Weld Joint for Inconel 617 Alloy and 12Cr Steel. *Science Discovery*. Vol. 5, No. 1, 2017, pp. 53-58. doi: 10.11648/j.sd.20170501.19

Received: January 18, 2017; Accepted: February 18, 2017; Published: April 12, 2017

Abstract: The Inconel 617 nickel base alloy and 12Cr steel were welded by auto-TIG welding method, the microstructure and mechanical properties of dissimilar weld joint were investigated. The results showed that the optimized TIG welding process could obtain no defect dissimilar weld joint. Characterization on the microstructure of the weld joint showed that the weld metal was the coarsened columnar crystal with the secondary precipitation phase distribution in interdendritic which was growth with each other and through the weld layers. HAZ of 12Cr consisted of coarse grain zone, fine grain zone, and carbides near the fusion line of Inconel 617 change obviously. The hardness distribution of welded joint showed that HAZ near 12 Cr steel existed tempered soften zone, the minimum hardness is 240 HV; hardness of weld was fluctuant, and the average hardness is about 330 HV because of the coarsened columnar crystal and the secondary precipitation phase distribution in interdendritic in weld; hardness of 617 side gradually reduced from the fusion line to the parent metal. Tensile test of the weld joint fractured at HAZ near 12Cr; the lowest value of impact energy test occurred at HAZ near 617. Mechanical properties test result showed that the performance can satisfy the requirements.

Keywords: Inconel 617/12Cr Dissimilar Metal, Weld Joint, Microstructure, Mechanical

Inconel 617镍基合金与12Cr钢异种材料 焊接接头组织与力学性能研究

王朋^{1*}, 徐华力², 刘霞¹

¹上海电气电站设备有限公司汽轮机厂, 上海, 中国

²材料科学与工程学院, 上海交通大学, 上海, 中国

邮箱

wangpeng@shanghai-electric.com (王朋)

摘要: 采用自动钨极氩弧焊 (TIG) 的方法完成了Inconel 617镍基合金与12Cr钢异种材料焊接工艺试验, 针对焊接接头的微观组织及力学性能进行表征与研究。研究结果表明: 采用TIG焊接方法及优化工艺可以获得无缺陷的异种材料焊接接头。接头组织表征发现: 焊缝组织为粗大的柱状晶奥氏体组织, 二次析出相分布于枝晶间, 柱状晶在层间为联生长, 并穿过多层; 12Cr侧热影响区 (HAZ) 主要包括粗晶及细晶马氏体组织, 而617侧HAZ近熔合线附近碳化物变化明

显。焊接接头硬度测试表明：12Cr侧HAZ存在硬度最低值为240HV，该处为回火软化区；焊缝硬度波动较大，平均硬度约为330HV，这与焊缝中粗大的柱状晶组织及枝晶间的二次析出相有关；617侧硬度由HAZ向母材逐渐降低。焊接接头的拉伸断裂发生在12Cr侧HAZ硬度最低值处，617侧HAZ冲击功最低，接头的力学测试结果表明性能均满足使用要求。

关键词：617/12Cr异种材料，焊接接头，组织表征，力学性能

1. 引言

近年来，能源与环境问题成为影响人类生活的主要问题，火力发电将长期处于我国的能源主要地位，因此，要努力解决碳排放并提高发电效率，通过提高蒸汽温度，提高热效率并降低CO₂排放为当前首选的解决方案[1]。当蒸汽温度提高到700℃以上，耐热钢已经不能满足使用需求，镍基合金由于其具有优良的高温性能和组织稳定性，成为高温用材料的最佳选择[2-4]。

Inconel 617镍基合金是固溶强化型的Ni-Cr-Co-Mo高温合金，该合金由于其较好的高温力学性能和抗蠕变性能，广泛地应用在电站、航天、化工以及核工业，因此成为电站用700℃超超临界机组的首选材料之一[5]。由于镍基合金价格相对较高，且不同构件工作温度不同，可以在温度较低、应用风险较小的区域选择相对便宜的材料，充分发挥各种材料的潜能，异种材料连接成为构件制造的有效途径。镍基合金与合金钢异种材料焊接时，由于两种材料的化学成分、组织及力学性能差异较大，会给焊接接头带来高组织梯度、大应力梯度等难题。因此，有必要针对异种材料焊接材料选择、焊接工艺规范、焊后热处理、接头组织以及力学性能等方面开展研究，从而推动异种材料

焊接接头在构件制造中的应用。Hosseini H S等[6]人研究了617和310异种材料焊接时，选择了三种焊接材料，研究结果表明，617焊接材料室温下表现出更加理想的焊接接头综合性能。Ahmad H等[7]人研究了617和12Cr异种材料焊接接头的力学性能和腐蚀性能，初步得到了室温下焊接接头的拉伸性能，断裂位置均在12Cr侧附近。

本文采用自动钨极氩弧焊（TIG）开展Inconel 617镍基合金与12Cr钢试板的对接试验，研究焊接工艺参数及热处理规范对接头质量的影响，优化焊接工艺参数。同时，针对异种材料焊接接头的组织及接头力学性能进行研究，获得Inconel 617镍基合金与12Cr异种材料焊接接头的组织变化规律及力学性能，为617与12Cr异种材料焊接接头在行业中的应用提供理论及数据支撑。

2. 试验材料和方法

试验使用的材料是Inconel 617镍基合金试板以及12Cr钢试板，其中Inconel 617镍基合金供货态为固溶热处理状态。Inconel 617镍基合金及12Cr钢的主要的化学成分见表1所示。

表1 Inconel 617镍基合金及12Cr钢的主要化学成分（Wt.%）。

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	V	Co
Inconel 617	0.052	0.062	0.031	0.008	0.006	21.63	9.15	Bal.	1.02	-	12
12Cr钢	0.13	0.08	0.40	0.006	0.001	10.57	1.02	0.78	0.004	0.18	-

两块试板尺寸为400×130×50mm，采用刚性拘束固定组对，坡口间隙13mm。采用自动钨极氩弧焊（TIG）的方法多层单道焊接而成。焊接完成后，进行680℃×10h的焊后热处理，然后进行取样，对接头组织和力学性能进行测试分析。

3. 结果与讨论

3.1. 焊接接头组织分析

焊接接头的力学性能与其微观组织有着密切的联系，因此首先针对该异种接头的微观组织进行分析。图1 所示为焊接接头的宏观形貌，其中焊接接头包括了母材（BM），热影响区（HAZ），以及焊缝金属（WM）三个部分。焊缝宽度约为13 mm，焊缝组织呈现柱状晶形貌，具有多层特征，层与层之间柱状晶为联生生长，并穿过多层生长。12Cr钢侧HAZ在宏观上观察较为明显。从宏观形貌上可以看出，焊接接头的各区域分布，且无气孔、裂纹等缺陷存在，表明该焊接工艺是可行的。

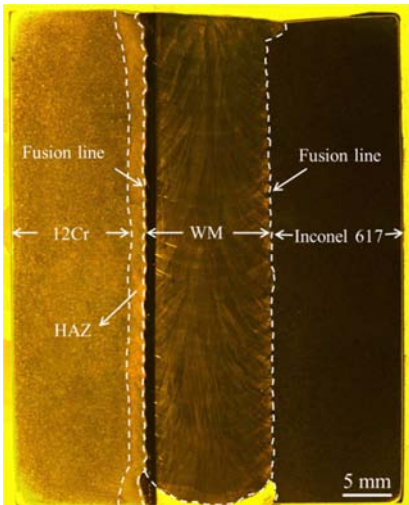


图1 焊接接头的宏观形貌。

图2所示为12Cr钢母材的金相组织，12Cr钢母材的主要组织为板条马氏体，原始奥氏体晶粒较为粗大，表明该

组织具有较高的强度和硬度。图3 所示为Inconel 617母材的金相组织，母材为奥氏体组织，晶粒尺寸较大。基体中存在大量的退火孪晶和 $M_{23}C_6$ 及Ti (C, N) 析出相[7-10]。

其中 $M_{23}C_6$ 数量相对较多，分布不均匀，可观察到 $M_{23}C_6$ 碳化物条带。Ti (C, N) 数量较少，颗粒较大，在光学显微镜下呈橘红色，分布在晶界或晶内。

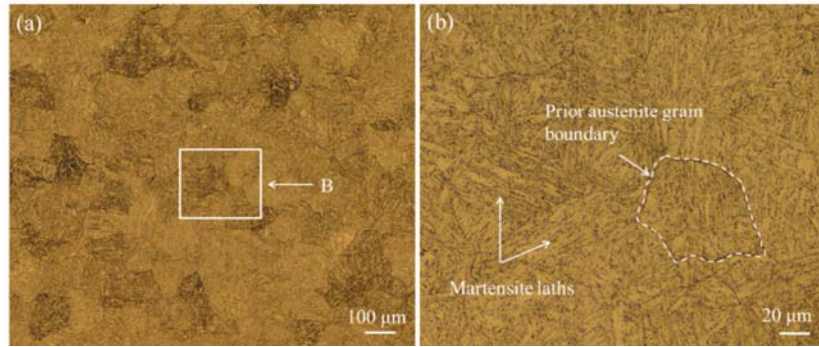


图2 12Cr钢母材组织: (a) 母材组织 (b) 粗大的原奥氏体晶粒。

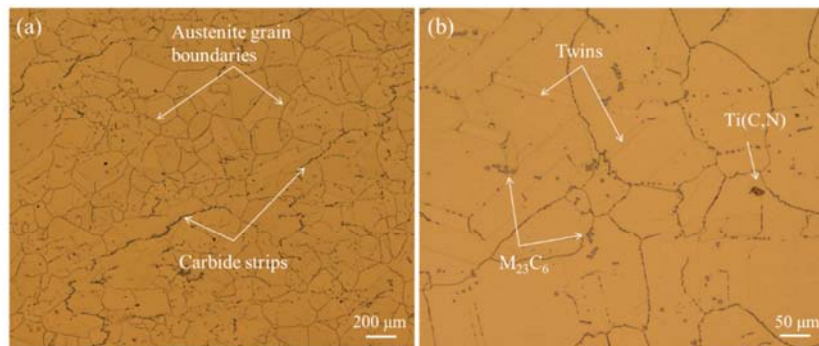


图3 Inconel 617母材显微组织: (a) 母材组织, (b) 母材中析出相。

图4 所示为焊缝显微组织，柱状晶逆着热传导方向生长，每一层焊道厚度约为1.5 mm。层与层之间柱状晶为联生生长。柱状晶由生长方向一致的枝晶构成，由于Cr、Mo、Ti等元素的偏析作用，枝晶间有大量的二次相生成。层间

与焊层中组织主要区别在于枝晶间二次析出相含量不同。层间由于金属再熔，二次相析出较少，焊层由于下一层的加热作用，枝晶间二次相析出较多。

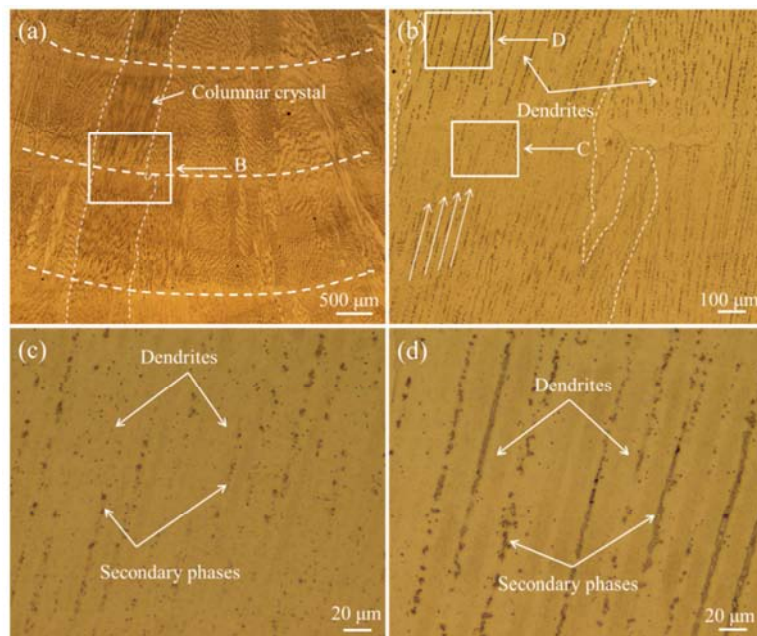


图4 焊缝显微组织: (a) 焊缝柱状晶组织, (b) 层间及周围组织, (c) 层间枝晶组织, 枝晶间二次相含量较少, (d) 焊层枝晶组织, 枝晶间二次相含量较多。

图5 所示为12Cr钢侧热影响区组织，主要为粒状回火马氏体。由于焊接热循环的作用，HAZ 的不同区域的组织呈现出不同的特征。图5 (b)–(d) 分别表征熔合线附近的粗晶区组织、细晶区组织以及过回火区组织。焊接过程中，

粗晶区与细晶区的温度高于Ac3。在奥氏体化的过程中由于临近熔合线区域过热，晶粒生长粗大，为粗晶区；细晶区由于焊接热循环温度相对较低，晶粒细小。过回火区主要为回火马氏体组织。

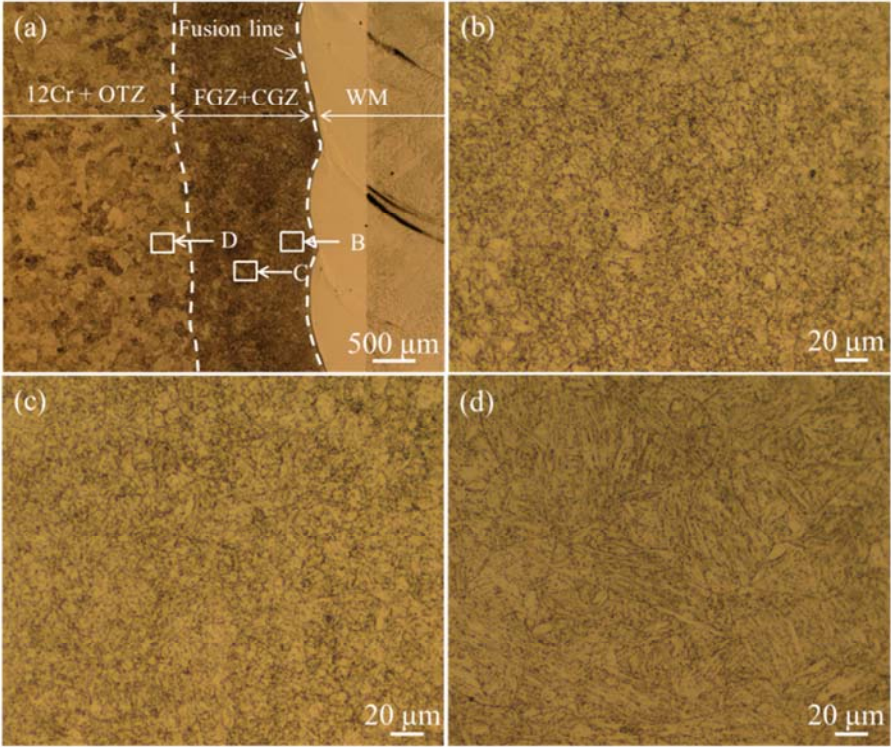


图5 12Cr侧热影响区显微组织：(a) 12Cr侧热影响组织，(b) 粗晶区组织，(c) 细晶区组织，(d) 过回火组织。

图6 所示为Inconel 617侧热影响区附近显微组织，其主要组织仍为奥氏体，晶粒大小没有明显的变化，组织上很难区分热影响区的宽度。在距熔合线100 μm范围内，原始碳化物在焊接热的作用下与基体发生反应，形态发生明显变化。

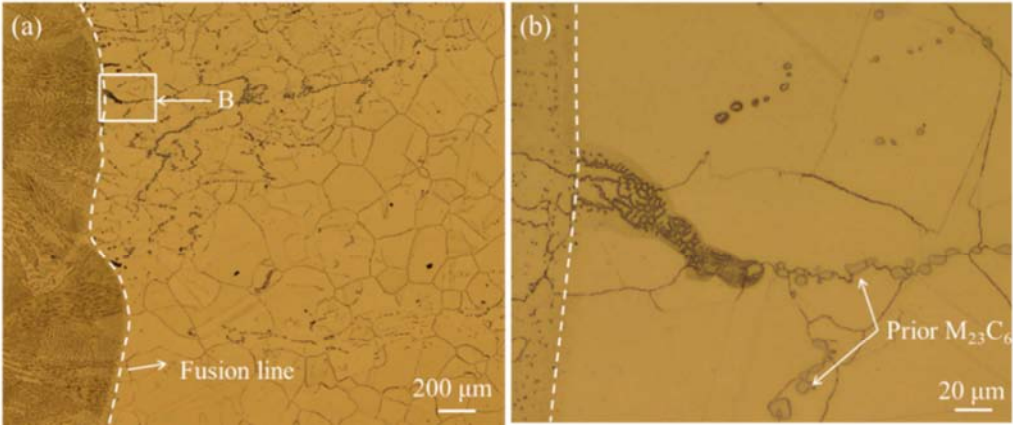


图6 Inconel 617侧热影响区附近显微组织：(a) 母材靠近熔合线附近组织，(b) 局部放大。

3.2. 焊接接头的硬度分布

焊接接头的硬度分布与各区域的组织形态及力学性能相关。因此针对全焊接接头沿其长度方向进行硬度测试，采用9.8N的载荷，0.25mm间隙，持续时间为15s。硬度测试的结果如图7 所示。焊缝中硬度波动较大，在330HV左

右波动，最低达到300 HV，最高达到350HV。这与焊缝中粗大的柱状晶组织及枝晶间的二次相有关。
在12Cr钢侧，硬度最高点出现在12Cr侧热影响区的粗晶区（CGZ），随着远离熔合线，硬度值逐渐下降，至过回火区（OTZ）处下降最低至240 HV。在过回火区中硬度有所回升，并在12Cr母材（BM）处达到稳定，稳定在270 HV。

由此可以推测出, 12Cr侧热影响区的宽度约为3 mm, 其中CGZ与FGZ的宽度约为1.5 mm, OTZ的宽度约为1.5 mm。在Inconel 617侧, 硬度最高出现在靠近熔合线处, 随着远离熔合线, 硬度值逐渐下降, 距熔合线10mm达到稳定, 稳定在240HV范围, 但总体波动较大, 这与母材中较大的奥氏体晶粒尺寸及分布不均匀的碳化物有关。

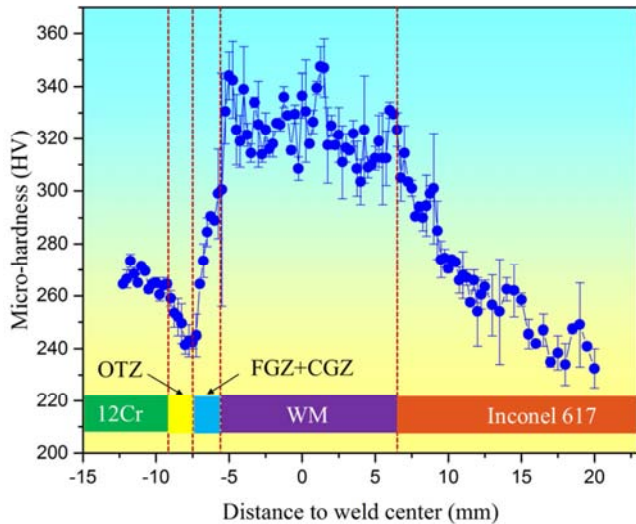


图7 全焊接接头硬度分布图。

3.3. 焊接接头的拉伸性能

采用电火花线切割的方法取焊后热处理后的焊接接头试料, 并车制拉伸试样, 原始标距取为25mm, 覆盖焊缝及两侧的热影响区。测试焊接接头的室温(25℃)、550℃及600℃下的拉伸性能, 所有拉伸试样均断在12Cr钢侧HAZ的过回火区, 拉伸试样断裂照片如图8所示, 试验结果如图9所示。室温下, Inconel 617/12Cr焊接接头塑性变形明显, 而550℃及600℃下, 塑性变形明显降低, 表明Inconel 617母材具有较好的热强性。从图8可以看出, 随着温度的升高, 抗拉强度和屈服强度不断减小, 屈服比增大。



图8 不同温度焊接接头拉伸试样断裂照片：(a) 25℃, (b) 550℃, (c) 600℃。

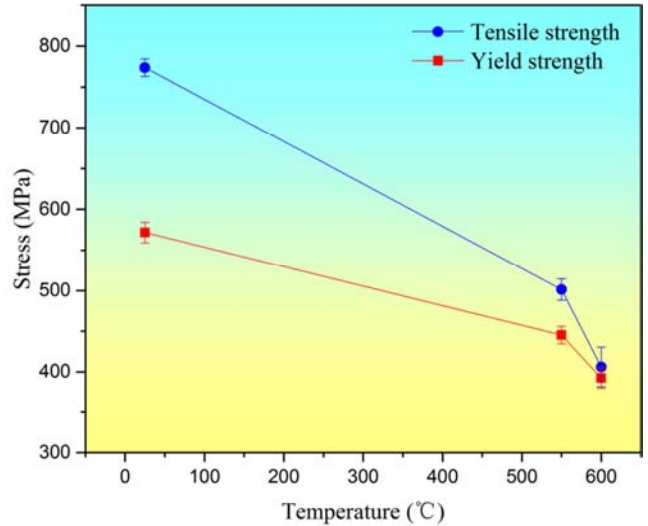


图9 焊接接头的拉伸性能。

3.4. 焊接接头的冲击性能

采用电火花线切割的方法取焊后热处理后的焊缝及两侧母材的冲击试料, 并加工冲击试样。V型缺口中心分别在Inconel 617母材、Inconel 617侧HAZ、焊缝中心、12Cr侧HAZ以及12Cr钢母材处。对各个区域的室温冲击进行测试, 冲击试验结果如图10所示, 可以看出, 焊接接头各区域冲击韧性较好, 均高于规范要求值。

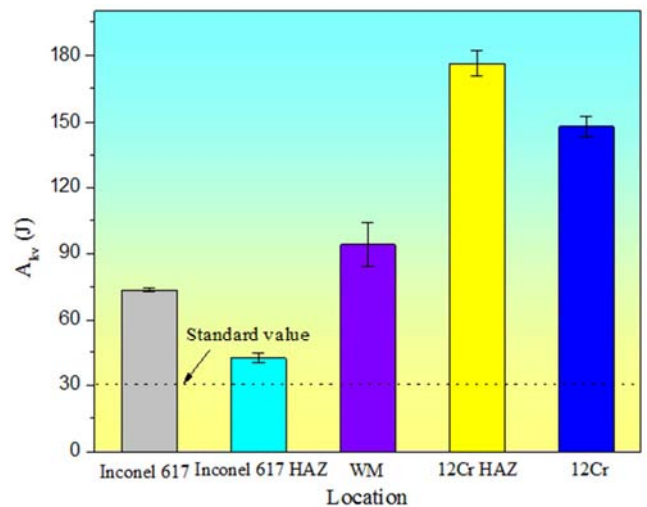


图10 焊接接头各区域的冲击性能。

4. 结论

本文研究了采用钨极氩弧焊方法获得的Inconel 617镍基合金与12Cr钢焊接接头, 并针对该异种材料焊接接头的组织及接头力学性能进行研究。研究表明, 采用TIG焊接方法及优化工艺可以获得无缺陷的异种材料焊接接头; 获得的焊缝组织为粗大的柱状晶奥氏体组织, 二次析出相分布于枝晶间, 柱状晶在层间为联生长, 并穿过多层; 12Cr侧热影响区(HAZ)主要包括粗晶及细晶马氏体组织, 而617侧HAZ近熔合线附近碳化物变化明显; 接头硬度显示, 焊缝硬度波动较大, 平均硬度约为330HV, 这与

焊缝中粗大的柱状晶组织及枝晶间的二次析出相有关;焊接接头的拉伸断裂发生在12Cr侧HAZ硬度最低值处,617侧HAZ冲击功最低,接头的力学测试结果表明性能均满足使用要求。

参考文献

- [1] 田仲良,包汉生,何西扣,等. 700℃汽轮机转子用耐热合金的研究进展[J]. 钢铁, 2015, 27(2):54-60.
- [2] Bohan, WANG, Shufang. Aging Precipitation Behavior and Mechanical Properties of Inconel 617 Superalloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 26(3):307-312.
- [3] 王会阳,安云岐,李承宇,等. 镍基高温合金材料的研究进展[J]. 材料导报, 2011(S2):482-486.
- [4] 江河,董建新,张麦仓,等. 700℃超超临界锅炉管用617B合金时效组织演变[J]. 稀有金属材料与工程, 2016(4):982-989.
- [5] Mankins WL, Hosier JC, Bassford TH. Microstructure and phase stability of Inconel alloy 617. Metall Trans 1974;5:2579-90.
- [6] Hosseini H S, Shamanian M, Kermanpur A. Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds[J]. Materials Characterization, 2011, 62(4):425-431.
- [7] Ahmad H, Hwang J, Ju L, et al. An Assessment of the Mechanical Properties and Microstructural Analysis of Dissimilar Material Welded Joint between Alloy 617 and 12Cr Steel[J]. 2016, 6(10).
- [8] 杨仁杰,刘文,芦凤桂. Inconel 617镍基合金焊接接头热影响区组织和性能分析[J]. 上海金属, 2015, 37(4):26-29.
- [9] 郭岩,周荣灿,张周博,等. 镍基合金617B的组织结构与力学性能稳定性[C]// 中国电机工程学会年会. 2014.
- [10] 王硕,刁旺战,杨权,等. 700℃关键部件验证试验平台用617B合金焊接接头组织和力学性能研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(10):849-852.