

引用格式:王开松,许昌军,胡庆生,等. 316L(N)-IG 锻件 Arc TIG 焊接接头的组织和力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2025, 54(6): 134-137+141.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20240438

<http://www.rjggy.net> [rjggy@vip.163.com](mailto:rjggy@vip.163.com)

# 316L(N)-IG 锻件 Arc TIG 焊接接头的组织和力学性能研究

王开松<sup>1</sup>, 许昌军<sup>1,2</sup>, 胡庆生<sup>2</sup>, 彭学兵<sup>2</sup>, 胡晓月<sup>2</sup>, 赵君煜<sup>2</sup>, 姜娟<sup>2</sup>, 任伟<sup>3</sup>

(1. 安徽理工大学 机电工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031; 3. 中国核工业二三建设有限公司, 北京 101300)

**摘要:**诊断屏蔽模块是国际热核聚变实验反应堆(ITER)诊断窗口插件的核心部件,其水循环回路盖板采用能一次焊透7 mm且焊缝背面无飞溅的自动 Arc TIG 进行焊接,其与传统 TIG 焊接相比,焊接电流较大。为了研究大电流对 Arc TIG 焊接接头显微组织和力学性能的影响,从而为产品生产提供可靠的焊接参数,采用7 mm厚316L(N)-IG (IG是 ITER Grade 的简写)奥氏体不锈钢锻件作为研究对象,进行 Arc TIG 焊接试验。结果表明,焊缝为单一的奥氏体相,并未发现裂纹缺陷;焊接接头室温和高温条件下的抗拉强度均大于316L(N)-IG 锻件最低设计值,试样被弯曲180°后,焊缝表面未出现任何裂纹;室温下焊缝和热影响区冲击吸收功均大于60 J,断口呈现韧性断裂模式,且 SEM 分析发现断口处具有细小的韧窝,表现出良好的冲击韧性。

**关键词:**国际热核聚变实验反应堆;316L(N)-IG;自动 Arc TIG 焊接;大焊接电流;显微组织;力学性能

中图分类号: TG444+.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2025)06-0134-04

## Study on Microstructure and Mechanical Properties of Arc TIG Welded Joint of 316L(N)-IG Forging

WANG Kaisong<sup>1</sup>, XU Changjun<sup>1,2</sup>, HU Qingsheng<sup>2</sup>, PENG Xuebing<sup>2</sup>, HU Xiaoyue<sup>2</sup>, ZHAO Junyu<sup>2</sup>, JIANG Juan<sup>2</sup>, REN Wei<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 3. China Nuclear Industry 23 Construction Co., Ltd., Beijing 10130, China)

**Abstract:** Diagnostic shield module is the core component of international thermonuclear experimental reactor (ITER) diagnostic port plug, and its water circuit network lids are welded by automatic Arc TIG welding, which has capability to weld 7 mm thickness in a single pass and no spatter under the backside of the weld. Its welding current is higher compared to conventional TIG welding. In order to study the effect of high current on the microstructure and mechanical properties of Arc TIG welded joints, which can provide reliable welding parameters for production of products, taking 7 mm thick 316L(N)-IG (IG is an abbreviation for ITER Grade) austenitic stainless steel forgings as research object, the Arc TIG welding was carried out. The results show that the microstructure of the weld zone is single austenitic phase, and no cracks are found. The ultimate tensile strength of the welded joints at room and high temperature are greater than minimum design requirements of 316L(N)-IG forging. There is no visible crack on the surface of the welds of the specimens after bending to 180°. The impact absorption energy of the welding area and heat affected zone at room temperature are greater than 60 J, the fracture surface shows a ductile fracture mode with fine dimples observed by SEM analysis, which indicates that the welded joint has good impact toughness.

**Key words:** ITER; 316L(N)-IG; automatic Arc TIG welding; high welding current; microstructure; mechanical properties

收稿日期: 2024-03-04

基金项目: 合肥综合性国家科学中心能源研究院协同创新项目(GXXT-2022-012); 12号赤道窗口集成(P)系统设计与集成项目(Y25QT15561)

作者简介: 王开松(1969-), 男, 安徽肥东人, 教授, 博导, 从事机械结构设计与分析研究; E-mail: 6668978wks@163.com

通讯作者: 许昌军(1987-), 男, 安徽六安人, 硕士, 主要研究方向: 诊断屏蔽模块结构设计及其水冷回路焊接工艺;

E-mail: xucj@ipp.ac.cn

国际热核聚变试验堆(ITER)计划<sup>[1-3]</sup>是国际科技合作工程之一, ITER水平12号诊断窗口插件是安装于ITER装置主机赤道面的重要诊断集成系统<sup>[4]</sup>, 其

主要功能是容纳用于诊断等离子体和第一壁相关参数的诊断设备和监测仪器,为这些设备和仪器提供可靠的支撑平台、中子屏蔽、热屏蔽并且确保其结构完整性,以实现其功能和维护要求。

诊断屏蔽模块是直接容纳诊断设备和监测仪器的二级容器,是诊断窗口插件的重要组成部分,其结构中设计了水循环回路在运行期间冷却各系统和烘烤期间加热整个窗口插件。密封水循环回路的堵头盖板设计符合 RCC-MR 2007 规范中 RC 3833.3 章节中的 II.1 型焊接接头,是典型的 I 型对接接头,具有 7 mm 厚、全焊透、背面不可接近、单面焊双面成形、背气保护和焊缝根部无飞溅的特征。相关研究论文表明电子束焊接<sup>[5-6]</sup>和激光焊接<sup>[7]</sup>的焊缝均会有飞溅物产生,而冷却通道最小直径为 2.5 mm,飞溅物存在堵塞水循环回路的风险。传统手工 TIG 焊,要求设计坡口型焊接接头,不利于所有位置堵头的应用,而 FRONIUS 制造的自动 Arc TIG 焊接设备,是基于高密度电弧的穿孔焊接原理,具有相同能量却作用于较小的区域,产生更深、更窄的焊接熔池。焊接时由机械臂带动焊枪行走,可精准控制行走轨迹和焊接速度,能实现在不开焊接坡口的情况下完成单面焊双面成形,焊缝根部光滑、均匀且无飞溅。但其主要缺点是在实现一次全熔透 7 mm 厚奥氏体不锈钢焊接接头时需采用较大焊接电流,从而导致焊接热输入过大,会对焊接接头的质量和性能产生不利影响,需通过焊接工艺研究合适的焊接参数和焊接工艺以确保焊接接头质量达标。故本文针对 7 mm 厚 316L(N)-IG 锻件的 Arc TIG 焊接进行了工艺研究,并分析其焊接接头显微组织和力学性能,从而为产品生产提供可行的焊接方法及焊接工艺参数。

## 1 试验材料与方法

试验材料为某公司生产的 316L(N)-IG 奥氏体不锈钢锻件,其化学成分如表 1 所示。室温力学性能: $R_m=545\text{ MPa}$ , $R_{p0.2}=321\text{ MPa}$ , $A=54\%$ 。250℃条件下力学性能: $R_m=445\text{ MPa}$ , $R_{p0.2}=246\text{ MPa}$ , $A=46\%$ 。通

表 1 316L(N)-IG 奥氏体不锈钢的化学成分(质量分数,%)  
Tab.1 Chemical composition of 316L(N)-IG austenitic stainless steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.025	0.27	1.77	0.017	0.003	17.3	2.39
Ni	Cu	Nb	Co	B	N	Ta
12.3	0.06	0.019	0.035	0.0006	0.068	0.005

过线切割制备 2 块尺寸均为 526 mm×156 mm×7 mm 的试件,不开焊接坡口。

试验所用焊接设备由 2 台并联的 TRANSTIG 5000 Job G/F 焊接电源、TTW 7200 R Arc TIG 焊枪和 CU 4700 水冷机构组成,Arc TIG 焊枪安装在 FANUC M-10iD/25 机器人手臂上。采用 97 vol% 氩气和 3 vol% 氢气混合气体作为焊枪保护气体,纯氩气(99.999 wt%)作为焊缝背面和正面保护气体。焊前通过浸泡式清洗法去除试件表面油污、氧化皮等杂质,并用无水乙醇擦式。采用 150 A 电流点焊对接拼装试件,间隙不超过 0.2 mm,再用夹具将其固定于试验平台上,然后采用自动 Arc TIG 焊枪按照表 2 所示的焊接工艺参数进行单面焊,所使用的焊材是  $\phi 1.0\text{ mm}$  无磁性的 ER317L(mod.),其化学成分如表 3 所示。依据标准 ISO 1011-1—1998 选择热效率因子 k 为 0.6 时,计算得焊接热输入为 7.7 kJ/cm。

表 2 Arc TIG 焊接工艺参数  
Tab.2 Process parameters of arc TIG welding

焊接电流 /A	焊接速度 / $(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	送丝速度 / $(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	焊枪混合保护气流量 / $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
410	0.36	1.2	25

表 3 ER317L(mod.)焊材的化学成分(质量分数,%)  
Tab.3 Chemical composition of ER317L(mod.) filler material (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N
<0.01	0.4	5.2	0.013	0.012	18.8	4.1	17.1	<0.1	0.15

焊后经过 X 射线对焊接接头进行无损检查,未发现裂纹、气孔等缺陷。试样经磨制抛光后,使用硫酸铜盐酸水溶液腐蚀后,采用 AXIO Vert.A1 型金相显微镜对微观组织进行观察,并对焊缝处进行了 X 射线衍射(XRD)分析。在 GNT300A 电子式万能试验机上进行拉伸试验,包括依据标准 ISO 6892-2:2018 制备的高温(200℃和 250℃)拉伸试样及开展的试验。在 NI300 摆锤式冲击试验机上进行常温冲击试验,并采用 ZEISS sigma 300 型扫描电子显微镜观察冲击试样的断口形貌。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 焊接接头显微组织分析

运用德龙图的铬镍当量计算公式<sup>[8]</sup>:

$$Cr_{eq}(\%) = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb$$

$$Ni_{eq}(\%) = Ni + 30C + 30N + 0.5Mn$$

计算得焊缝熔覆金属中铬当量和镍当量分别为 20.27% 和 15.9%,  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  为 1.27。由图 1 可知,焊缝中铁素体含量为 0%, 这意味着焊缝的凝固模式为全奥氏体 A 模式,焊缝组织为单一的奥氏体相。图 2 给出了焊缝处 X 射线衍射分析,可见明显的奥氏体的 3 个强峰,没有观察到其他峰,可以判定焊缝为全奥氏体组织,这与运用德龙图确定焊缝中无铁素体含量相符。一般奥氏体不锈钢焊缝金属中 5%~10% 的铁素体可以打乱奥氏体柱状晶的方向,细化晶粒,从而避免焊接热裂纹的产生<sup>[8]</sup>。Dai 等<sup>[9]</sup>对奥氏体不锈钢焊缝裂纹敏感性研究,结果表明,在全奥氏体 A 模式下凝固的焊缝,其 P、S、B 元素质量分数总和小于 0.02wt%,且  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  小于 1.5,即使是全奥氏体 A 凝固模式,焊缝也不易开裂。由于本文研究的母材和焊

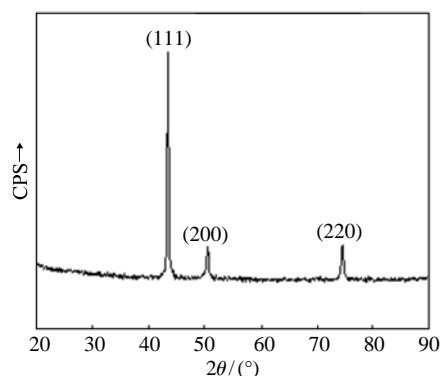


图 2 焊缝处的 XRD 分析结果  
Fig.2 Results of XRD at the weld

材中杂质元素被严格控制,P、S、B 元素质量分数总和约 0.013wt%,因此,避免了焊接接头热裂纹的产生。

图 3 为 Arc TIG 焊接接头焊缝不同部位的显微组织,显示为单一的奥氏体相,整个焊缝未观察到裂纹缺陷。焊缝区以柱状树枝晶形态向两侧生长,近似垂直于熔合线方向,可明显观察到焊缝上部和中部组织向斜下方生长,而下部焊缝组织向水平或斜向上方生长;并且形成一层密排的柱状枝晶,柱状晶生长方向性较弱,这可能与大电流焊接时高热输入给工件加热导致温度梯度变化较大有关。

## 2.2 焊接接头的力学性能测试

抗拉强度是评估 Arc TIG 焊接接头机械性能的另一重要指标,图 4 为焊接接头室温拉伸载荷-位移曲线,图 5 为高温拉伸试样焊接接头断裂位置。通

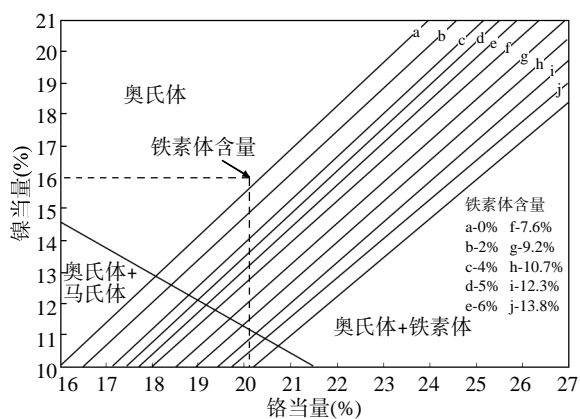


图 1 预测铁素体含量的德龙图

Fig.1 Delong diagram for predicting weld ferrite content

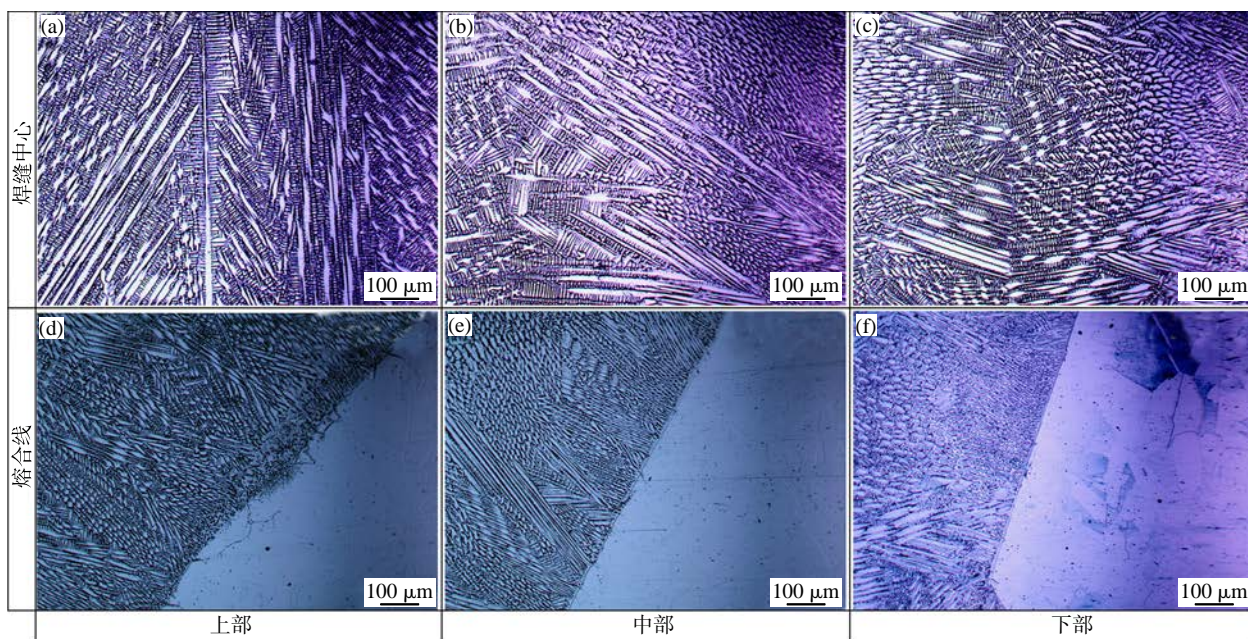


图 3 Arc TIG 焊接接头焊缝不同部位的显微组织

Fig.3 Microstructure of different parts of Arc TIG welded joint weld

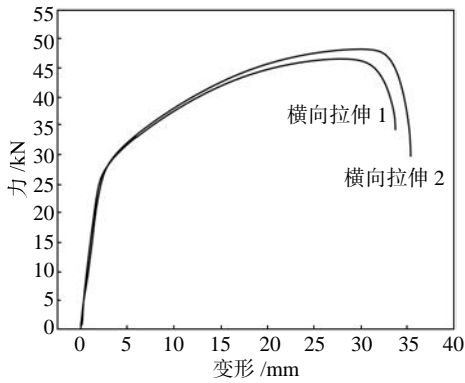


图4 Arc TIG 焊接接头的室温拉伸载荷-位移曲线  
Fig.4 Room tensile load-displacement curves of the Arc TIG welded joint

过计算得, 室温抗拉强度可达到 555 MPa, 200 °C 抗拉强度可达到 451 MPa, 250 °C 抗拉强度可达到 428 MPa, 且均高于 316L(N)-IG 要求最低抗拉强度(即设计要求), 见表 4。所有室温拉伸试样断裂于母材, 高温拉伸试样断裂于焊接接头, 且断裂面与拉伸载荷约成 45°角, 端口处有明显的缩颈现象, 说明焊接接头具有良好的塑性。

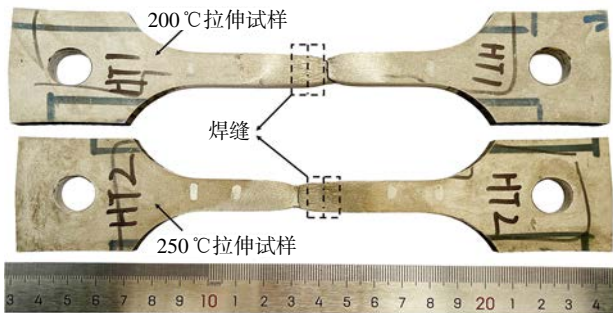


图5 高温拉伸试样焊接接头断裂位置  
Fig.5 The fracture location of the welded joint of high temperature tensile specimens

表 4 不同测试温度下的拉伸性能

Tab.4 Tensile properties at different test temperatures

编号	温度 /°C	抗拉强度 $R_m$ /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	$R_m$ 设计要求 /MPa	断裂位置
1#	20	555	-	525	母材
2#	20	555	-	525	母材
3#	200	451	207	425	焊接接头
4#	250	428	206	415	焊接接头

图 6 是室温下横向正弯和背弯试样弯曲后的形貌, 横截面尺寸为 7 mm×20 mm, 弯曲直径为 28 mm。弯曲试样被弯成 180°后, 焊缝表面非常光滑, 没有出现任何微裂纹, 这表明 ArcTIG 焊接接头具有很好的弯曲强度和塑性, 已达到焊接接头设计要求。

母材 316L(N)-IG 锻件伸长率大于 45%, 具有



图6 焊接接头弯曲后试样  
Fig.6 Specimens of the welded joint after bending

良好的冲击强度。为进一步研究大焊接电流对焊缝及热影响区的冲击性能影响, 分别在焊缝和热影响区各取 3 件试样, 其宽度为 10 mm、厚度为 5 mm、长度为 55 mm, 均开 V 形夏比缺口, 且缺口面垂直于试样表面。图 7 给出了各试样室温条件下的冲击试验结果。可以看出, 焊接接头焊缝区和热影响区冲击吸收功均远大于 60 J, 满足设计标准 RCC-MR 2007 第 RS3234.43 章节规定的冲击能量, 表现出良好的冲击韧性。热影响区的冲击吸收功高于焊缝区, 平均值增加了约 8%, 这可能是焊缝区的残余应力和焊材中 Mn 元素含量高于热影响区造成的。通过图 8

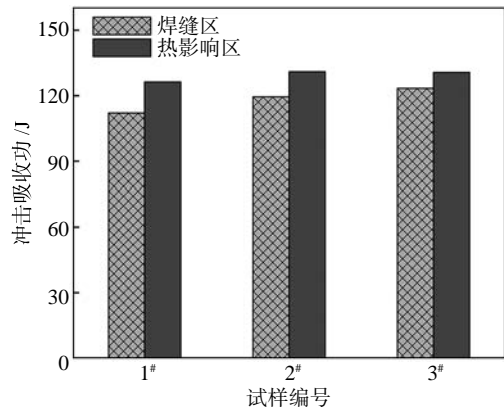


图7 焊接接头室温下的冲击试验结果  
Fig.7 Impact test results of the welded joints at the room temperature

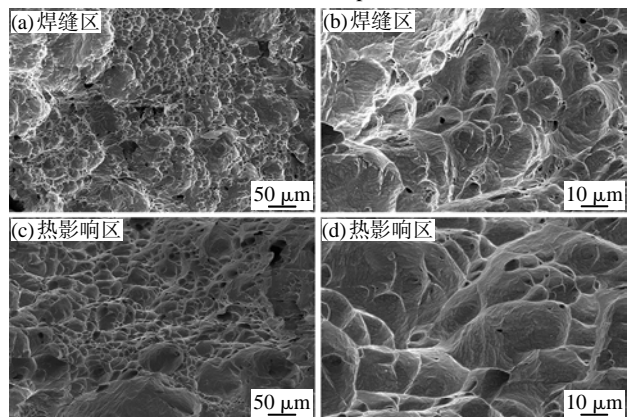


图8 室温冲击试样的断口形貌  
Fig.8 The fracture morphologies of impact specimen at room temperature

(下转第 141 页)

将通过共格界面向与其有位向关系的奥氏体晶粒内长大。为了减小弹性畸变能,铁素体将呈条片状沿奥氏体某一晶面向晶粒内伸展。

由于魏氏组织形成时伴生的表面浮凸现象,片状铁素体被认为以切变方式生长。按照长大动力学,冷却速度较低时, $\Delta T$ 较小,相变驱动力小,只能通过扩散而长大,因而易发展成等轴的晶界铁素体。冷却速度较高时, $\Delta T$ 较大,有足够的推动力,以高温切变的方式向晶内推进,并保持片状。总之,提高冷速有利于魏氏组织形成。本研究中,当加热温度在860~1000℃时,随炉冷却试样铁素体呈块状,无魏氏组织形成。在石棉冷却、室内冷却和风冷时均有不同等级的魏氏组织,且冷速从石棉冷却提高至室内冷却时,魏氏组织的等级增高。但是冷速过快,会抑制先共析铁素体的析出,所以风冷试样组织中魏氏组织含量减少,魏氏组织特征变得不明显<sup>[6-7]</sup>。即只在一定的冷速范围内提高冷速会促进魏氏组织的形成。当奥氏体化温度升高,奥氏体晶粒变大,铁素体片析出的切变阻力减小,有利于片状铁素体形成,与本试验中随着加热温度的升高魏氏组织等级增高相一致。

### 3 结论

(1) 45钢在本文试验研究的860~1000℃加

(上接第137页)观察焊接接头焊缝和热影响区冲击断口形貌发现,存在许多韧窝,属于韧性断裂,这说明焊缝具有良好的韧性。

### 3 结论

(1) 采用Arc TIG焊接的焊缝组织为单一的奥氏体相,且未发现裂纹缺陷,这与母材杂质元素P、S、B元素含量被严格控制和选择的焊接工艺参数有关。

(2) 常温拉伸试件断裂于母材,而高温拉伸试件断裂于焊接接头,其抗拉强度值均接近于母材,而高于316L(N)-IG锻件最低设计值。这说明选用ER317L(Mod.)无磁焊材与316L(N)-IG锻件进行Arc TIG焊接的焊缝性能满足产品设计要求。

(3) 室温焊缝和热影响区冲击试样均未被完全冲断,焊缝区域冲击吸收功略低于热影响区,其冲击吸收功均远大于60J设计值,且断口呈现出韧性断裂模式,表现出良好的冲击韧性。


参考文献:

热温度范围内,保温1h,随炉冷却后获得的组织中均无魏氏组织形成。

(2) 在加热温度相同时,冷却速度从石棉冷却提高至室内冷却时,魏氏组织等级升高;当冷却速度继续提高为风冷时,魏氏组织等级不再升高或呈下降趋势。

(3) 在相同的冷却速度下,当45钢的加热温度从860℃升高至1000℃,所得魏氏组织等级均呈升高趋势。

参考文献:

- [1] 朱明. 材料热处理原理及工艺[M]. 北京:中国矿业大学出版社,2013.
- [2] 张卫. 热处理实训[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [3] 高为国,吴安如,刘金武. ZG230-450钢魏氏组织的微观结构与力学性能[J]. 金属热处理,2003,28(4):39-42.
- [4] 程里,林江. ZG25CrMnNi焊补热影响区混晶魏氏组织的形成及改善[J]. 热加工工艺,2013,42(19):205-208.
- [5] 胡进. 45钢魏氏组织高温实时形成研究及工艺控制[J]. 特钢技术,2012,18(4):29-32.
- [6] 张磊,赵勇桃,霍文霞. 冷却速率对45Mn2钢魏氏组织的影响[J]. 热加工工艺,2017,46(12):228-231.
- [7] 职任涛,屠欢,肖纪美. 亚共析钢中魏氏组织形态的研究[J]. 北京钢铁学院学报,1983(1):146-155. 

- [1] 杜钧福. 话说ITER——纪念核聚变研究50周年[J]. 现代物理知识,2008(2):3-6.
- [2] 宋执权. 中国与国际热核聚变实验堆组织合作建设世界最大“人造太阳”[J]. 南方能源建设,2022,9(2):25.
- [3] 李林蔚,崔增琪,刘达,等. 聚变发展现状及展望[J]. 产业与科技论坛,2023,22(22):72-75.
- [4] Guirao J, Walsh M J, Udintsev V S, et al. Standardized integration of ITER diagnostics equatorial port plugs [J]. Fusion Engineering and Design, 2019, 146:1548-1552.
- [5] Dragunov V K, Sliva A P, Goncharov A L, et al. Specific features of electron-beam welding of ITER blanket first wall components[J]. Thermal Engineering, 2020, 67(6):387-395.
- [6] 夏小维,吴杰峰,刘志宏,等. 真空室窗口领圈316L厚板电子束焊接接头不均匀性[J]. 焊接学报,2019,40(9):53-58.
- [7] 王朋. 304不锈钢薄板激光焊接飞溅形成机理和控制方法及接头性能研究[D]. 上海:上海交通大学,2020.
- [8] 王亚婷. 奥氏体不锈钢焊缝韧性与组织规律性研究[D]. 南京:南京理工大学,2012.
- [9] Dai W H, Song Y T, Xin J J, et al. Investigation on the microstructure and mechanical properties of autogenous laser welding joint of ITER BTCC case lid [J]. Fusion Engineering and Design, 2020, 156:111607. 