

doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2023.02.002

试验研究

# N06200 镍基合金 TIG 焊接接头微观组织及力学性能研究

武靖伟,李义民,王志刚,王有银,付忠吉,陈淑红,胡广岐,陈宏伟,王子伟  
(兰州兰石重型装备股份有限公司,兰州 730314)

**摘要:**根据焊材匹配原则,采用 ERNiCrMo-17 焊丝对 6 mm 厚的 N06200 镍基合金板进行 TIG 焊接试验。通过金相分析、硬度、拉伸、弯曲等一系列试验,对 N06200 镍基合金 TIG 对接接头的力学性能和组织进行了研究。通过金相分析可以看出焊缝金属的金相组织主要由奥氏体组成;拉伸、弯曲试验表明,焊接接头的平均抗拉强度为 850.5 MPa,高于母材的抗拉强度(780 MPa),接头的抗拉强度较母材提高了 9.31%。接头的断裂形式为韧性+少许脆性断裂的混合断裂,未发现明显的解理断裂特征;在弯曲载荷的作用下,焊接接头整体弯曲性能良好,面弯及背弯试验结果均合格;硬度试验显示热影响区硬度最高,焊缝区域次之,母材硬度最低。

**关键词:**N06200 镍基合金;TIG 焊接;微观组织;力学性能

中图分类号:TH142.2;TG407

文献标志码:A

## Microstructure and mechanical properties of TIG welded joint of N06200 nickel base alloy

WU Jingwei, LI Yimin, WANG Zhigang, WANG Youyin, FU Zhongji, CHEN Shuhong,  
HU Guangqi, CHEN Hongwei, WANG Ziwei  
(Lanzhou LS Heavy Equipment Co., Ltd., Lanzhou 730314, China)

**Abstract:** According to the principle of welding material matching, TIG welding experiment of N06200 nickel base alloy with 6 mm thickness were carried out with ERNiCrMo-17 wire. Through a series of tests of the welded joints such as the metallographic analysis, hardness, tensile and bending tests, the mechanical properties and microstructure of TIG welded joints of N06200 nickel base alloy were studied. It can be seen through metallographic analysis that the microstructure of the weld metal is mainly austenite. The tensile and bend test show that the average tensile strength of welded joint is 850.5 MPa, which is larger than the base metal (780 MPa), and the tensile strength of the joint is increased by 9.31% over the base metal. The fracture form of welded joint is the mixed fracture of ductile fracture and slight brittle fracture, and no obvious cleavage fracture is found. Under the action of bending load, the overall bending property of the welded joint is good, and face bend test and root bend test are qualified. The micro hardness test shows that the micro-hardness of HAZ is the highest and the base metal is the lowest. The micro-hardness of weld zone is between HAZ and base metal.

**Key words:** N06200 nickel base alloy; TIG welding; microstructure; mechanical properties

## 0 引言

随着石油、精细化工领域的快速发展,在各种苛刻的腐蚀介质环境下,设备材料的选取成为产品制造的一大难点。N06200 合金为美国某公司为适应苛刻腐蚀要求开发的一种优化材料<sup>[1]</sup>,该合金是在应用广泛的 N06059 合金中添加了 Cu 元素(1.5%),使其在不同的腐蚀环境下具有耐腐蚀能力,从而在化工领域得到优越的应用。N06200 合金板材所对应的 ASME 牌号为 SB-575 N06200,其开发除了抵抗盐酸、硫酸及氢氟酸等苛刻的腐蚀环境外,还扩大了 Ni-Cr-Mo 合金的应用范围。与以前的 Ni-Cr-Mo 合金单一的抗还原性或抗氧化性腐蚀不同,N06200 合金添加了 16% Mo 和 1.5% Cu,使其具有优良的抗还原性腐蚀能力,同时高 Cr 含量(23%)保证了合金的抗氧化能力<sup>[2]</sup>,因此,N06200 合金具有优良的抗氧化和抗还原性腐蚀能力<sup>[3]</sup>。

某设备的介质为极度危害的毒性气体,且具有较强的腐蚀性,因此对设备的选材要求较为苛刻,同时综合考虑材料的耐腐蚀性和经济性,最终选择哈氏 N06200 合金。与其他 Ni-Cr-Mo 合金和不锈钢相比,在同等厚度的镍基合金下,N06200 材料制成的设备可获得更久的寿命,也可在更恶劣的条件下得到更高的安全系数。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验采用 N06200 镍基合金钢板作为母材,板材对应的 ASME 牌号为 SB-575 N06200,规格为 600 mm × 135 mm × 6 mm,采用 ERNiCrMo-17 焊丝作为填充材料,焊丝规格为 2.0 mm,试验母材及焊丝的化学成分见表 1。对母材进行力学性能检测,母材的抗拉强度为 780 MPa,屈服强度为 374 MPa,断面延伸率为 63%。

表 1 试验母材及焊丝的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of base metal and arc welding wire

材料	Ni	Cr	Mo	Cu	Mn	C	Si	S	P
N06200	59	23	16	1.6	0.19	≤0.01	≤0.08	≤0.01	≤0.02
ERNiCrMo-17	57.92	23.30	16.47	1.57	0.09	0.008	0.01	0.001	0.001

### 1.2 焊接工艺

N06200 母材采用手工钨极氩弧焊进行焊接,焊接工艺参数见表 2。焊接坡口为 60°单面 V 型

坡口,钝边为 0~1 mm,装配间隙为 3 ± 1 mm,如图 1 所示。焊接保护气体为 99.99% 的 Ar 气,流量为 12~17 L/min。

表 2 N06200 合金 TIG 焊接工艺参数

Tab. 2 The TIG welding parameters of N06200 nickel-base alloy

焊序	焊接方法	焊接材料	直径/mm	电源极性	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	氩气流量/(L·min <sup>-1</sup> )
1	手工钨极氩弧焊	ERNiCrMo-17	∅2.0	直流正接	90~110	15~17	60~80	12~17
2	手工钨极氩弧焊	ERNiCrMo-17	∅2.0	直流正接	120~140	15~17	85~110	12~17

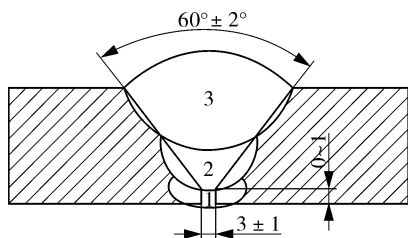


图 1 焊接坡口型式

Fig. 1 Welding groove types

焊前应对坡口进行目视检查及 PT 检测,其后采用洁净的丙酮或酒精对坡口部位及其两侧约 50 mm 的范围擦拭,目的为清理母材表面所有影

响焊接质量的油污、机加溶液残留、记号笔标记、粉尘等,必要时在清洗后采用不锈钢钢丝刷清理坡口及其附近范围。

焊接时采用具有高频引弧和电流衰减装置的氩弧焊机,提前通气和焊后断气以达到对焊缝保护的作用。在焊接过程中,尽量采用直径大于 10 mm 的大焊枪进行焊接,并采用气体保护拖罩达到保护气体的异常扰动和焊缝的作用。正面焊接时,背面采用氩气连续跟踪保护,保护效果可以通过焊缝的颜色来评判,银白色最佳<sup>[4]</sup>。

焊接后,用 X 射线探伤仪对焊接接头进行 RT 检测,以检测焊缝内部是否存在气孔、裂纹等

焊接缺陷;待 RT 检测合格后,从焊接接头中部取出拉伸试样和面背弯试样进行拉伸试验和弯曲试验,拉伸试验结束后采用扫描电镜对拉伸断口形貌进行观察,再采用显微硬度仪对焊接接头进行硬度测量;并取 2 个平行试样按照 ASTM G28—2002 Method A 进行晶间腐蚀试验。

### 1.3 焊接控制要点

在焊接过程中,与其他镍基合金一样,最主要的问题为焊接过程中热裂纹的产生,产生热裂纹的主要原因为焊缝凝固时存在低熔点金属和低熔点共晶物液膜残留晶界,在收缩应力的作用下发生开裂<sup>[5-8]</sup>,从焊接工艺的角度上可通过采用较小的热输入焊接和层间温度的控制来防止热裂纹的发生。为降低焊接过程中的热输入,可通过采用窄焊道焊接实现,焊接时尽量不要摆动,同时层间温度控制在 100 ℃ 以下<sup>[9]</sup>。由于弧坑也可能导致热裂纹的产生,故焊后应对起弧和收弧部位进行打磨。

## 2 接头成形及微观组织分析

### 2.1 接头宏观形貌

在正式焊接前,选取 1 块同材料、同厚度及

同坡口型式试板进行单道试验分析,以获得单道焊缝的熔深、熔宽和余高等数据。从数据中分析选择熔池宽、余高低的焊接工艺参数为基础,通过多次试验,最终获得了成形良好、性能最佳的接头焊接工艺参数,焊接接头宏观形貌如图 2 所示。可以看出,焊缝表面成形优美,且无咬边、裂纹等表面缺陷出现,经过 X 射线检测,在焊接接头内部未发现气孔、夹渣、裂纹等内部焊接缺陷。



图 2 焊接接头宏观形貌

Fig. 2 Macro morphology of welded joint

### 2.2 金相组织分析

对焊接接头进行金相组织观察,接头各区域的微观组织见图 3。可以看出,焊缝与母材完全熔合,熔合线清晰,焊缝无裂纹、夹杂、气孔等焊接缺陷。

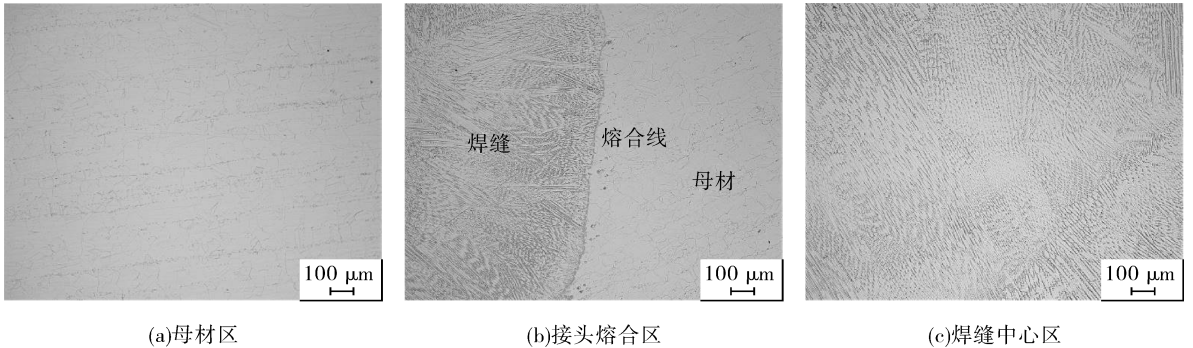


图 3 焊接接头微观组织

Fig. 3 Microstructure of welded joint

从图 3(b)可以看出,焊缝与母材之间无明显的热影响区,分析原因为 N06200 母材组织为均匀的多边形晶粒(见图 3(a)),焊接起始阶段熔化的液态金属刚接触到母材,由于热导系数较高,细小的晶粒迅速形成。随着焊接过程的进行,在连续的热输入和焊接速度下,晶粒沿垂直于熔合线的方向形成柱状树枝晶,树枝晶的生长方向性强,沿着散热相反的方向生长至焊缝中心,发现焊缝区主要为胞状晶、柱状树枝晶和等轴晶组成,枝

晶生长方向随机,局部区域有等轴晶,等轴晶的存在在一定程度上可抑制热裂纹的产生<sup>[10-11]</sup>。而 N06200 合金中高的 Cr 含量(23%)可防止晶界渗碳物析出,从而减少了晶界附近的贫 Cr 现象,从而提高了抗氧化和抗腐蚀性能<sup>[12-13]</sup>。

### 2.3 晶间腐蚀试验

在 N06200 合金对接焊接接头中部取 2 个平行试样按照 ASTM G28—2022 Method A 进行晶间腐蚀试验,试样尺寸均为 30 mm × 20 mm × 6 mm,

表面用 80<sup>#</sup> 水砂纸打磨,打磨后置于 25 g 硫酸铁 + 400 mL 蒸馏水 + 236 mL 硫酸的混合溶液中进行晶间腐蚀试验<sup>[11]</sup>,试验时间为 24h。结果显示 2 个试样的腐蚀率分别为 0.58 g/m<sup>2</sup>·h 和 0.72 g/m<sup>2</sup>·h,满足产品技术要求和标准规定。

表 3 5 种镍基合金的主要元素化学成分及腐蚀率

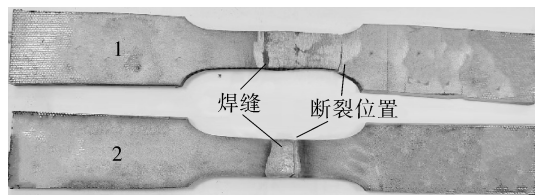
Tab. 3 Corrosion rate and chemical composition of five kinds of nickel base alloys

材料	主要元素成分(%)				腐蚀率/ (g·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )
	Ni	Cr	Mo	Cu	
N06200(C2000 合金)	57.3	23.12	15.77	1.62	0.65
N06059(59 合金)	59.34	22.68	15.43	—	0.46
N06022(C22 合金)	59	22	13	—	0.42
N08825(825 合金)	42.5	20.0	2.6	2.0	0.225
N10276(C276 合金)	57.57	16.03	16.06	—	0.59

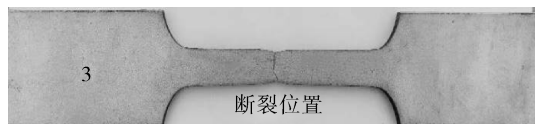
### 3 接头力学性能分析

#### 3.1 拉伸性能分析

在 X 射线检测合格的焊接接头中部平行切取 2 件拉伸试样(1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>)进行拉伸试验,并从母材中切取一件试样(3<sup>#</sup>)进行拉伸试验进行对比,拉伸试样宏观形貌如图 4 所示。可以看出,1<sup>#</sup>焊接接头试样断于焊缝位置,2<sup>#</sup>焊接接头试样断于母材位置。



(a) 焊接接头



(b) 母材

图 4 拉伸试样宏观形貌

Fig. 4 Macro morphology of tensile samples

对 3 个试样的抗拉强度进行对比,如图 5 所示。可以看出,1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>焊接接头的抗拉强度均大于 3<sup>#</sup>母材试样的抗拉强度,焊接接头的抗拉强度较母材的抗拉强度提高了 9.31%,从而保

证了此焊接结构的安全运行。说明整个焊缝的强度和稳定性最佳,同时验证了焊接结构的一致性。

证了此焊接结构的安全运行。说明整个焊缝的强度和稳定性最佳,同时验证了焊接结构的一致性。

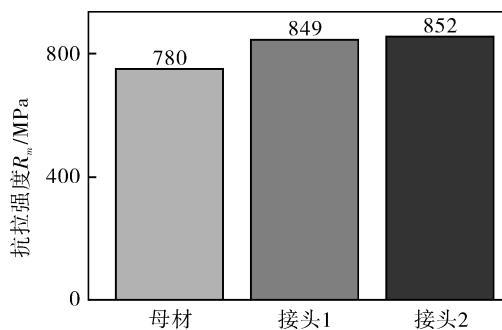
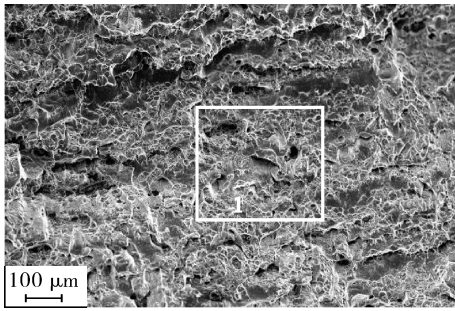


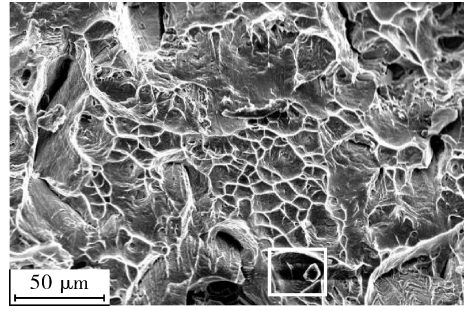
图 5 N06200 合金母材与焊接接头抗拉强度对比

Fig. 5 Comparison diagram of tensile strength of N06200 base metal and welded joint

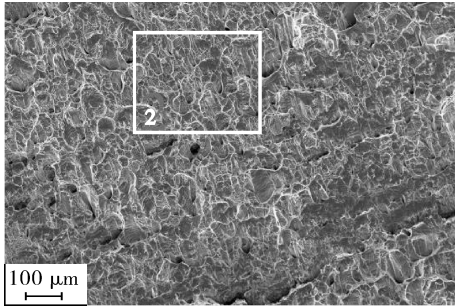
为判断焊接接头的拉伸断裂形式,采用扫描电镜对拉伸断口进行观察,其断口形貌如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,焊接接头的断口中存在大量参差不齐的韧窝,说明焊接接头的断裂主要以韧性断裂为主。图 6(b)示出在焊接接头断裂时,接头存在较多的小韧窝,且少许部位出现撕裂,故判断该部位为脆性断裂。因此,从整体来说该焊接接头的断裂形貌为韧性 + 少许脆性断裂的混合型断裂,其与母材断口形貌(见图 6(c)(d))相比,母材断口平滑,且为等深度的韧窝,说明母材断裂为韧性断裂。



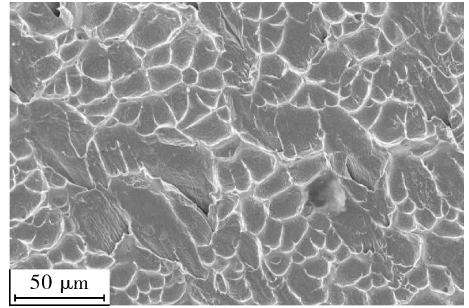
(a) 焊接接头断口形貌



(b) 1 区域局部放大图



(c) 母材断口形貌



(d) 2 区域放大图

图6 母材与焊接接头断口形貌

Fig. 6 Fracture surface morphologies of the N06200 base metal and welded joints

对图 6(b) 中所标注的位置进行 EDS 点扫描,扫描结果如图 7 所示。可以看出,断口部位主要元素为 Ni, Cr, Mo 三种元素,判断此部位的成分为 NiCrMo 金属间化合物。

下,焊接接头整体弯曲性能良好,面弯及背弯试验结果均合格。

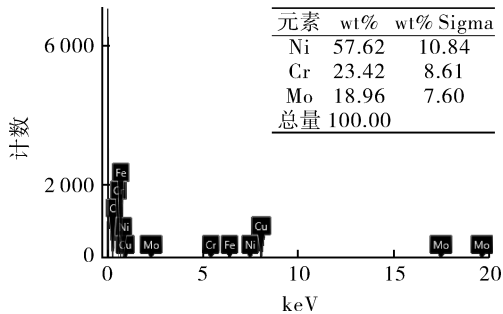


图7 焊接接头断口位置的能谱分析

Fig. 7 EDS analysis of welded joint fracture position

### 3.2 弯曲性能分析

在 X 射线检测合格的焊接接头中部平行切取 4 件弯曲试样分别进行面弯和背弯试验,以获得焊接接头的弯曲性能。图 8 示出 N06200 合金焊接接头经面弯和背弯试验后的宏观形貌。可以看出,在一定弯曲载荷的作用下,焊接接头的正面和侧面均未发现大于 3.0 mm 的裂纹、气孔和夹渣物等焊接缺陷。结果显示在弯曲载荷的作用



图8 接头弯曲宏观形貌

Fig. 8 Macro morphology of bend samples

### 3.3 显微硬度分析

对接头距上、下表面 1.6 mm 处、 $T/2$  处分别进行硬度测量,硬度分布结果如图 9 所示。可以看出,热影响区硬度最高,焊缝区域次之,母材硬度最低。分析原因是与母材相比,焊缝区域出现大量的树枝状晶。分析原因为采用多层焊可使每道焊缝尺寸变小,即柱状晶成长的空间减小,有利于晶粒细化,而硬度由基本晶粒的尺寸决定,并满足  $HV = HV_0 + k_H d^{-1/3}$ ,即随着晶粒的细化,硬度随之升高<sup>[19]</sup>,因此焊缝区域硬度较母材区高。

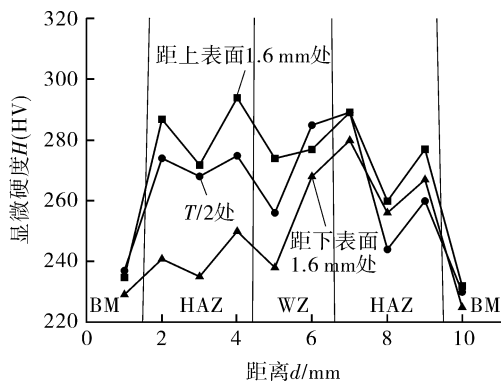


图9 焊接接头显微硬度分布

Fig. 9 Micro hardness distribution curves of welded joint

## 4 结论

(1) N06200 合金钨极氩弧焊焊缝无明显的热影响区,母材为均匀的多边形奥氏体晶粒,焊缝区为胞状晶、柱状树枝晶和等轴晶奥氏体组织,枝晶生长方向随机,局部区域有等轴晶,可抑制热裂纹的产生。

(2) N06200 合金对接焊接接头的平均晶间腐蚀率为  $0.65 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ ,满足产品技术要求和标准规定。

(3) N06200 合金对接焊接接头的断裂方式为韧性+少许脆性断裂的混合型断裂,未发现明显的解理断裂;接头平均抗拉强度为  $850.5 \text{ MPa}$ ,均大于母材的抗拉强度 ( $780 \text{ MPa}$ ),接头的抗拉强度较母材提高了  $9.31\%$ ;在弯曲载荷的作用下,焊接接头整体弯曲性能良好,面弯及背弯试验结果均合格;热影响区硬度最高,焊缝区域次之,母材硬度最低。

### 参考文献:

[1] 邢卓. Hastelloy C 系列合金综述[J]. 化工设备与管道, 2007, 44(2): 51-58.  
XING Zhuo. Summary of haste alloy C series alloys [J]. Process Equipment & Piping, 2007, 44(2): 51-58.

[2] 刘清会. 哈氏合金 C2000 焊接工艺[J]. 化工设备与管道, 2016, 53(3): 43-45.  
LIU Qinghui. Research of welding procedure for hastelloy C2000 [J]. Process Equipment & Piping, 2016, 53(3): 43-45.

[3] 刘清. 哈氏 HC-2000 合金的特性和容器设计制造

工艺特点[J]. 化工设备与管道, 2007, 44(4): 62-65.

LIU Qing. Properties of HC-2000 alloy and characteristics of vessel design and fabrication[J]. Process Equipment & Piping, 2007, 44(4): 62-65.

[4] 杨永磊, 李海强, 杨添程. 因康洛依 800H 裂纹产生原因分析及焊接机理[J]. 焊接技术, 2011, 40(9): 59-60.

YANG Yonglei, LI Haiqiang, YANG Tiancheng. The welding crack analysis and welding process of iniconel 800H [J]. Welding Technology, 2011, 40(9): 59-60.

[5] 余磊, 曹睿. 镍基合金焊接裂纹研究现状[J]. 金属学报, 2021, 57(1): 16-28.

YU Lei, CAO Rui. Welding crack of Ni-based alloys: A review [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(1): 16-28.

[6] 施允威. 镍基合金的焊接[J]. 化学工业与工程技术, 2007, 28(增刊): 216-217.

SHI Yunwei. The welding of Ni-based alloys [J]. Energy Chemical Industry, 2007, 28(Sup. 1): 216-217.

[7] 张伟, 朵元才, 张建晓, 等. 热丝 TIG 堆焊 Alloy 59 镍基合金工艺及其堆焊层性能研究[J]. 压力容器, 2020, 37(5): 13-17.

ZHANG Wei, DUO Yuancai, ZHANG Jianxiao, et al. Research on hot-wire TIG surfacing nickel-based alloy 59 process and its surfacing properties [J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(5): 13-17.

[8] 魏立华, 杨志海, 贺德先, 等. 真空电子束焊接在镍基合金空冷器制造中的应用[J]. 压力容器, 2022, 39(7): 81-86.

WEI Lihua, YANG Zhihai, HE Dexian, et al. Application of vacuum electron beam welding technology in the manufacture of nickel base corrosion resistant alloy air cooler [J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(7): 81-86.

[9] 黄菁, 孙宇峰, 方超, 等. 聚变堆用奥氏体不锈钢不同激光输出模式熔丝特征[J]. 焊接, 2022(7): 28-33.

HUANG Jing, SUN Yufeng, FANG Chao, et al. Fuse characteristics under different laser output modes of austenitic stainless steel for fusion reactor [J]. Welding & Joining, 2022(7): 28-33.

[10] 唐正柱, 陈佩寅, 吴伟. Nb 对镍基合金高温失塑裂纹敏感性的影响机理[J]. 焊接学报, 2008(1): 109-112.

TANG Zhengzhu, CHEN Peiyin, WU Wei. Effect of

- niobium on ductility drop cracking susceptibility of nickel base alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008(1):109-112.
- [11] 王纯,贾小斌,冯伟,等. 热丝 TIG 堆焊 UNS S32707 特超级双相不锈钢工艺试验研究[J]. 压力容器, 2021, 38(5):22-25.  
WANG Chun, JIA Xiaobin, FENG Wei, et al. Experimental research on hot wire TIG overlay welding process of UNS S32707 super duplex stainless steel [J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(5):22-25.
- [12] 刘奇聪,马振,吕鹏,等. Cr 含量对 Fe-B-C 系耐磨合金堆焊层组织和硬度的影响[J]. 焊接, 2022(2):26-30.  
LIU Qicong, MA Zhen, LÜ Peng, et al. Influence of Cr content on microstructure and hardness of Fe-B-C wear-resistant alloy surfacing layer [J]. Welding & Joining, 2022(2):26-30.
- [13] 田雷. 焊接工艺对 Incoloy 825 镍基合金接头力学性能及耐腐蚀性能的影响[J]. 焊接技术, 2021, 50(5):48-52.  
TIAN Lei. Effect of welding technology on mechanical properties and corrosion resistance of nickel-based alloy [J]. Welding Technology, 2021, 50(5):48-52.
- [14] 李艳美,王明家,江山昱,等. 超低碳 C-276 合金敏化处理对显微组织及晶间腐蚀敏感性的影响[J]. 大型铸锻件, 2020(4):20-23.  
LI Yanmei, WANG Mingjia, JIANG Shanyu, et al. Effect of sensitization treatment on microstructure and Intergranular corrosion sensitivity of C-276 alloy with ultralow carbon [J]. Heavy Casting and Forging, 2020(4):20-23.
- [15] 郑跃武,楚志兵,李亚杰,等. Incoloy825 合金热变形行为与组织演变[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(6):2063-2072.  
ZHENG Yuewu, CHU Zhibing, LI Yajie, et al. Microstructure evolution and hot deformation behavior of incoloy825 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(6):2063-2072.
- [16] 王小莉,梁玉国,张骥. 镍基合金材料耐晶间腐蚀试验各种判定方法的探讨[J]. 理化检验(物理分册), 2006, 42(12):617-620.  
WANG Xiaoli, LIANG Yuguo, ZHANG Ji. The Discussion of all kinds of determining methods of Intergranular corrosion examination for Nickel alloy material [J]. Physica Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2006, 42(12):617-620.
- [17] 金光熙,岳洋,曹杰. C22 哈氏合金换热器腐蚀原因及其防护措施[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(2):158-160.  
JIN Guangxi, YUE Yang, CAO Jie. Corrosion reason and safeguard measures for Haste alloy C22 heat exchanger [J]. Corrosion & Protection, 2013, 34(2):158-160.
- [18] 李锡伟,王俊恒,强凯,等. N06059 镍基合金换热管-管板的焊接技术[J]. 焊接技术, 2019, 48(2):30-32.  
LI Xiwei, WANG Junheng, QIANG Kai, et al. The welding technology of N06059 Nickel alloy tube to tube sheet [J]. Welding Technology, 2019, 48(2):30-32.
- [19] 林一坚,尤云龙,井春永,等. Fe-B 基微晶材料晶粒大小与高温硬度的关系[J]. 金属学报, 1991, 27(2):104-107.  
LIN Yijian, YOU Yunlong, JING Chunyong, et al. Hot hardness and crystallite size of Fe-B micro crystallite material [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1991, 27(2):104-107.

---

**作者简介:**武靖伟(1992),男,中级工程师,主要从事压力容器焊接的研究工作,通信地址:730314 甘肃省兰州市兰州兰石重型装备股份有限公司, E-mail: wujingwei0119@163.com。

#### 本文引用格式:

武靖伟,李义民,王志刚,等. N06200 镍基合金 TIG 焊接接头微观组织及力学性能研究[J]. 压力容器, 2023, 40(2):11-17.

WU Jingwei, LI Yimin, WANG Zhigang, et al. Microstructure and mechanical properties of TIG welded joint of N06200 nickel base alloy [J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(2):11-17.