

文章编号:1673-5005(2022)02-0176-07 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2022.02.019

镍基泡沫防砂筛管 TIG 焊接头组织性能

冯涛^{1,2}, 邢付龙³, 孙永兴¹, 王炳英¹, 鲁铭洋¹, 邓肖肖¹

(1. 中国石油大学(华东)材料科学与工程学院, 山东青岛 266580; 2. 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001; 3. 上汽通用五菱汽车股份有限公司青岛分公司, 山东青岛 266500)

摘要:以厚度为 6 mm 的镍基泡沫金属为研究对象,采用 TIG 焊并选用 Inconel625 与 Inconel600 两种焊丝,探讨焊接工艺对焊缝成形、接头组织和性能的影响。结果表明:在本试验条件下,选用 Inconel625 焊丝,焊接电流为 60 A,焊前预热 150 °C, Y 形坡口和间断填丝的工艺时,所得到的焊接接头力学性能最优,抗拉强度可达 21.37 MPa,约为母材的 96.0%;接头断口以韧窝为主,且部分韧窝中存在以碳化物和非金属夹杂为主的第二相质点;焊缝表面为等轴晶,焊缝中部为等轴晶和树枝晶,层道交界处为胞状晶和柱状晶,熔合区为胞状晶和胞状树枝晶,热影响区晶粒明显长大;焊缝区和熔合区主要由 γ -Ni 和 γ 固溶体构成。

关键词:镍基泡沫金属; TIG 焊; 焊接接头; 组织性能

中图分类号: TG 401 **文献标志码:** A

引用格式:冯涛,邢付龙,孙永兴,等. 镍基泡沫防砂筛管 TIG 焊接头组织性能[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022,46(2):176-182.

FENG Tao, XING Fulong, SUN Yongxing, et al. Microstructure and property of TIG welding joint of nickel foam sand screen tube[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022,46(2):176-182.

Microstructure and property of TIG welding joint of nickel foam sand screen tube

FENG Tao^{1,2}, XING Fulong³, SUN Yongxing¹, WANG Bingying¹, LU Mingyang¹, DENG Xiaoxiao¹

(1. College of Material Science and Technology in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
3. SAIC-GM-Wuling Company Limited, Qingdao Branch, Qingdao 266500, China)

Abstract: The foam nickel with the thickness of 6 mm was selected for study. The TIG welding was used with Inconel625 and Inconel600 welding wires. The effects of welding process on welding formation, joint microstructures and properties were investigated. The results indicate that, under the test condition, when the Inconel625 welding wire is selected, the welding current is 60 A, the preheating temperature is 150 °C, the Y-shaped groove and intermittent wire filling process are adopted, and the mechanical properties of the welded joint are the best. That is to say, the tensile strength can amount to 21.37 MPa, which is about 96.0% of the base metal. There are dimples on the surface and some dimples contain second phase particles mainly composed of carbides and nonmetallic inclusions. The welding joint surface is covered with equiaxial crystals, the middle part of the welding joint is equiaxed crystal and dendrite, the cellular crystals and columnar crystals are distributed in the junction of layers, and the cellular crystals and cellular dendrites are distributed in the fusion zone. The grains in the heat affected zone grow obviously. The main phase of the welding zone and fusion zone are the γ -Ni and γ solid solution.

Keywords: nickel foam; TIG welding; welding joint; microstructure and property

收稿日期:2021-08-12

基金项目:先进焊接与连接国家重点实验室开放课题(AWJ-21M06);山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE108);中央高校基本科研业务费专项(18CX05002A)

第一作者:冯涛(1978-),男,副教授,博士,研究方向为材料的表面改性与新材料焊接。E-mail:ft_210750@163.com。

通信作者:王炳英(1972-),女,教授,博士,研究方向为焊接结构环境敏感断裂。E-mail:tdwby2004@126.com。

目前机械防砂是油田常用的防砂方法,常见的机械防砂方法有滤砂管、绕丝筛管、割缝筛管、管外砾石充填筛管、可膨胀筛管等,这些机械防砂方法各有优势,但都难以应对油井中后期出砂较严重的防砂任务^[1-4]。目前有一种新型镍基泡沫金属筛管,其挡砂层由高孔隙率、低孔径的镍基泡沫金属板卷制焊接而成。与传统机械防砂方法相比,镍基泡沫金属筛管具有更好的防砂效果。泡沫金属是金属基体中分布着无数孔洞的金属材料,因其独特的结构而兼有结构材料和功能材料的特点。泡沫镍是通过化工、机械等手段对高纯度金属镍作进一步深加工的产品,因其具有孔隙率高、比表面积大、质量均匀等特点,被广泛应用于超级电容器、减震器、过滤器、消防、化工催化剂、热交换器、环保废水治理等领域^[5-7]。可靠的连接是泡沫金属实现大规模生产和广泛工程应用的基础。焊接作为现代制造领域广泛应用的一种重要连接技术,可通过实现原子级连接获得可靠的接头。而泡沫金属因其结构的特殊性,采用常规焊接方法难以实现可靠的连接。目前关于泡沫金属焊接性的研究主要集中在泡沫铝领域,而关于镍基泡沫金属焊接的研究报道极少,因此迫切需要制定出可以获得优质焊接接头的镍基泡沫金属焊接工艺^[8-12]。笔者以厚度为 6 mm 的镍基泡沫金属为研究对象,采用 TIG 焊并选用 Inconel625 与 Inconel600 两种焊丝,探讨焊接工艺对焊缝成形、接头组织和性能的影响。

1 试验材料及方法

所用母材为通过电镀方法制备的镍基泡沫金属板,厚度为 6 mm。该材料为三维立体空隙结构,孔隙率约为 60%,其形貌见图 1。所用镍基泡沫金属为纯 Ni,选用 Inconel625 和 Inconel600 两种焊丝进

行填充,焊丝直径为 2 mm,所用的焊接工艺参数见表 1。采用多层多道焊,正面焊 2 道,背面焊 1 道。焊后利用光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)对接头形貌进行分析,利用 X 射线能谱分析仪(EDS)和 X 射线衍射仪(XRD)对接头的物相进行分析。

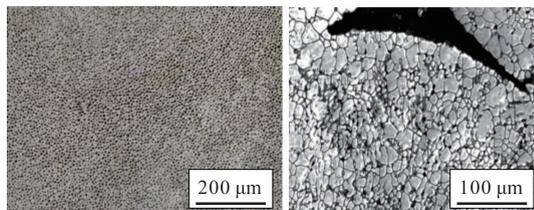


图 1 母材形貌

Fig. 1 Microstructure of base metal

表 1 镍基泡沫金属 TIG 焊接工艺参数

Table 1 TIG process parameters of nickel based foam metal

编号	焊材	坡口形式	预热温度/℃	填丝方式	焊接电流/A
1#	Inconel625	Y	150	间断	60
2#	Inconel625	Y	20	间断	60
3#	Inconel625	X	150	间断	60
4#	Inconel625	X	20	间断	60
5#	Inconel600	Y	150	间断	60
6#	Inconel600	Y	20	间断	60
7#	Inconel600	X	150	间断	60
8#	Inconel600	X	20	间断	60
9#	Inconel625	Y	20	连续	40
10#	Inconel625	I	150	间断	60
11#	Inconel625	Y	150	连续	60
12#	Inconel625	Y	150	间断	80

2 试验结果

2.1 焊后接头性能及组织分析

表 2 为焊接工艺对接头性能的影响,图 2 为焊后接头的宏观形貌。由表 2 可见,预热 150 ℃ 试样的抗拉强度高于室温焊接试样的抗拉强度,Y 形坡

表 2 焊接工艺对镍基泡沫金属接头性能的影响

Table 2 Effect of welding process on properties of nickel based foam metal joints

编号	焊缝成形性		缺陷	抗拉强度 σ /MPa	延伸率 δ /%	断面收缩率 ψ /%	断裂位置
	正面	背面					
1#	良好	良好	无	21.37	1.10	4.85	熔合线
2#	良好	良好	焊缝中部塌陷	18.47	0.88	4.79	熔合线附近母材
3#	良好	良好	无	20.25	1.32	4.11	熔合线附近母材
4#	良好	良好	无	11.69	1.28	2.93	熔合线
5#	良好	良好	无	20.2	1.04	4.53	熔合线附近母材
6#	良好	良好	无	14.76	0.92	3.83	熔合线附近母材
7#	良好	良好	无	17.5	1.76	4.24	熔合线
8#	良好	良好	无	9.74	0.84	1.68	熔合线附近母材
9#	良好	良好	未焊透	—	—	—	—
10#	良好	良好	未焊透	—	—	—	—
11#	良好	良好	熔合线裂纹	—	—	—	—
12#	良好	良好	熔合线裂纹	—	—	—	—
母材	—	—	—	22.26	1.20	5.45	—

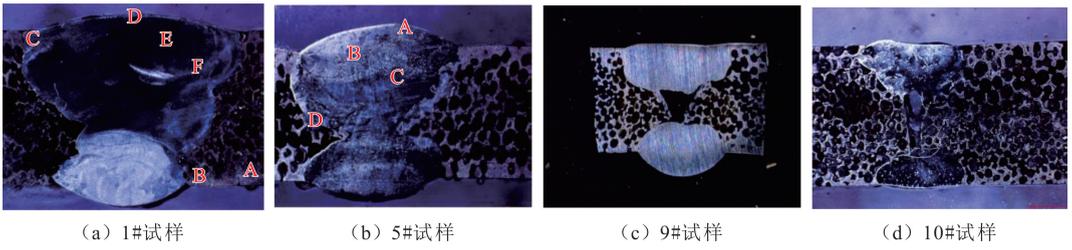
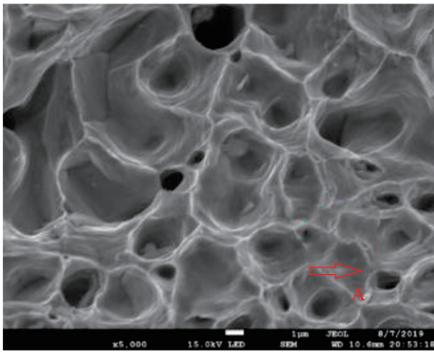


图2 焊接接头截面宏观形貌

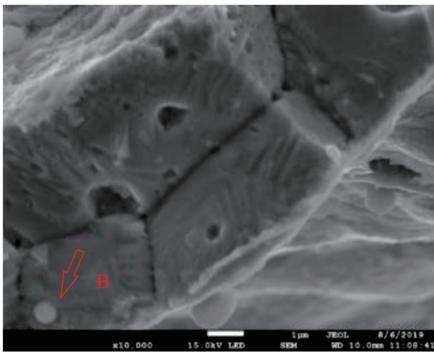
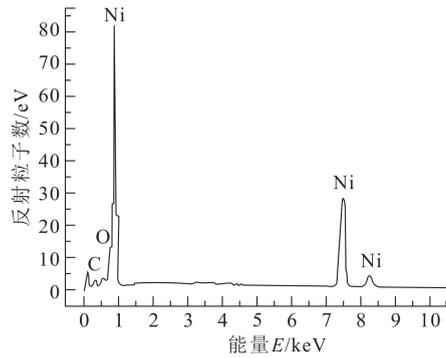
Fig.2 Welding joints cross section

口试样的抗拉强度高于 X 形坡口试样,采用 Inconel625 焊丝的试样整体抗拉性能高于 Inconel600 焊丝。由图 2 可见,若焊接参数选择不当,可能导致未焊透等缺陷。

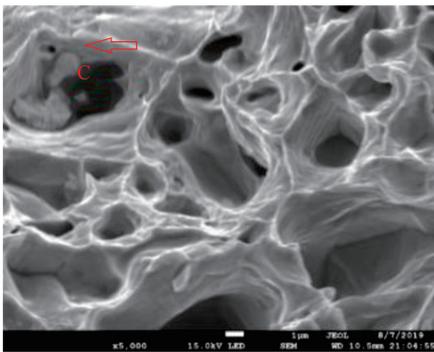
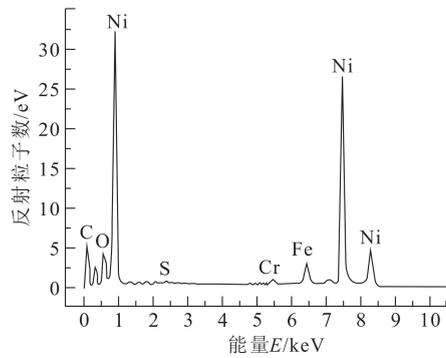
选取抗拉强度最高的 1#和抗拉强度最低的 8# 试样以及母材(图 3),分析其断口形貌,并对断口中的第二相质点进行 ESD 分析。由图 3 可见,1#试样和母材的断口上均分布有韧窝,部分韧窝中有第二



(a) 1#试样



(b) 8#试样



(c) 母材

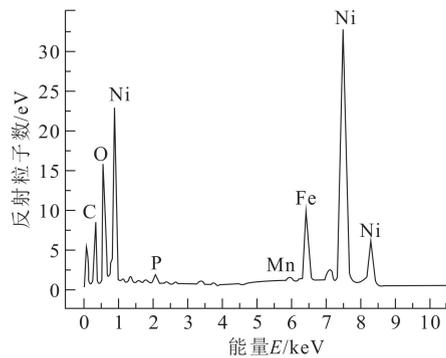


图3 拉伸断口形貌及第二相 EDS 分析

Fig.3 Tensile fracture SEM images and EDS analysis of welded joints

相质点,但 1#试样断口中的第二相数量较母材多且尺寸大;8#试样的断口呈冰糖状,为沿晶脆性断裂,同时断口处也存在第二相质点。EDS 分析表明,第二相质点中 C、O 等元素含量较高,由此推测第二相质点为碳化物或其他非金属夹杂物。

图 4 为 1#、8#试样和母材的拉伸曲线。由图 4 可见,1#试样和母材拉伸时,在断裂之前曲线上出现了多个屈服平台。泡沫材料结构上的不均匀性导致拉伸时各部分受力不均,出现应力集中区。当应力达到一定数值时,泡沫金属中的应力集中区域便会出现屈服现象,受柯氏气团对位错的钉扎作用使抗拉强度增大。而 8#试样表现为脆性断裂,这表明镍

基泡沫金属 TIG 焊接接头的性能受焊接工艺影响较大。

图 5、6 分别为 1#和 5#试样接头显微组织。由图 5 可见,使用 Inconel625 焊丝时,焊缝热影响区为粗大的等轴晶,熔合区母材侧为胞状晶,焊缝侧为树枝晶,焊缝表面为均匀细小的等轴晶,焊缝中部为胞状树枝晶,焊缝层道间由下至上为等轴晶→胞状晶→柱状晶。由图 6 可见,使用 Inconel600 焊丝时,焊缝表面为均匀细小的等轴晶,焊缝中部主要为等轴晶和树枝晶,焊缝层道间组织依次为胞状树枝晶→胞状晶→等轴晶。而熔合区由靠近母材处至焊缝内部,组织变化表现为平面晶→胞状晶→树枝晶。

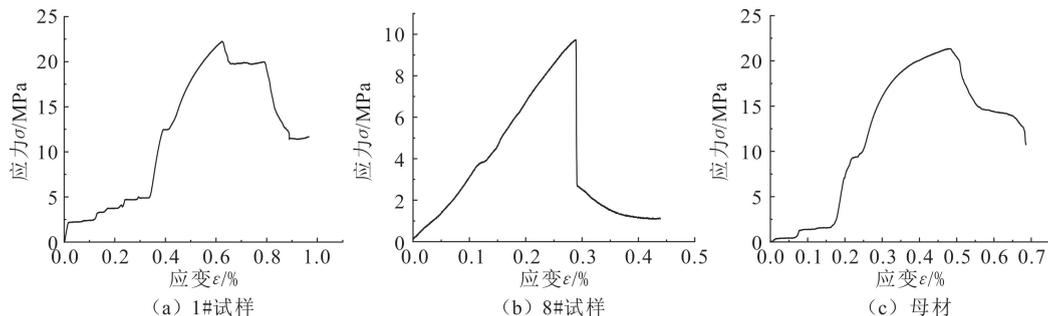


图 4 拉伸应力应变曲线

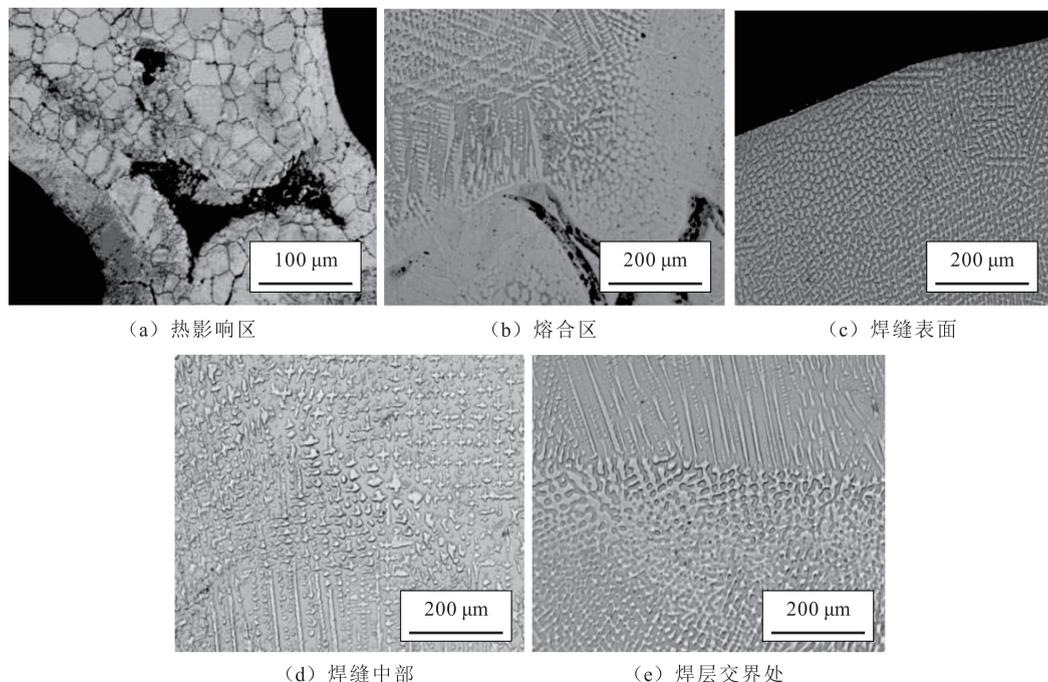


图 5 1#试样焊接接头显微组织

2.2 焊接接头物相分析

1#试样焊缝区和熔合区 XRD 衍射图谱见图 7, SEM 与析出相 EDS 测试结果见图 8。结果表明,焊缝区和熔合区主要为 γ -Ni 和 γ 固溶体

($\text{Cr}_2\text{Fe}_{6.7}\text{Mo}_{0.1}\text{Ni}_{1.3}\text{Si}_{0.3}$),且熔合区以 γ -Ni 相为主,焊缝区以 γ 固溶体为主。

5#试样焊缝区和熔合区 XRD 衍射图谱见图 9,焊缝区 SEM 和析出相 EDS 测试结果见图 10。由图

9 可见, 熔合区主要为 γ -Ni 和 γ 固溶体 ($\text{FeCr}_{0.29}\text{Ni}_{0.16}\text{C}_{0.06}$); 熔合区以 γ -Ni 相为主, 焊缝区以 γ 固溶体为主。由图 10 可见, 5# 试样晶粒内部与晶界上分布有白色析出物, 晶界处析出物呈

不规则片状, 而晶粒内部的析出物呈球形。图 10 中 A、B 区域 ESD 扫描结果表明, 该区域 Nb、Ti 的含量均高于焊丝, 该区域晶界处存在 Nb、Ti 元素富集的现象。

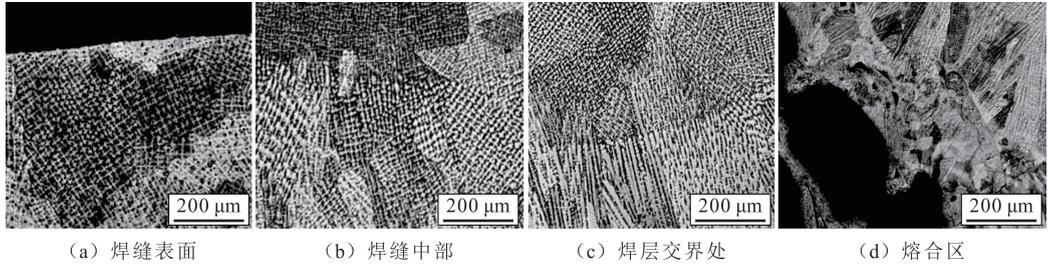


图 6 5# 试样焊接接头显微组织

Fig. 6 Microstructure of welded joint of sample 5

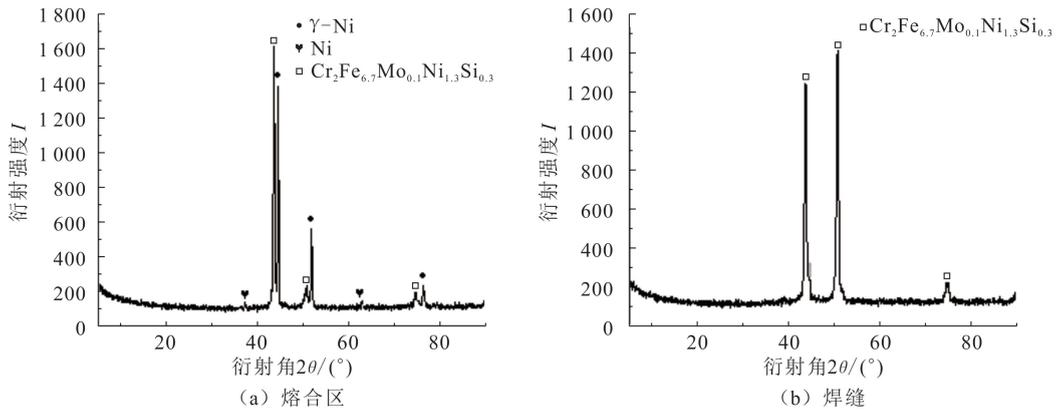


图 7 1# 试样焊接接头 XRD 衍射图谱

Fig. 7 XRD diffraction pattern of 1# sample welding joint

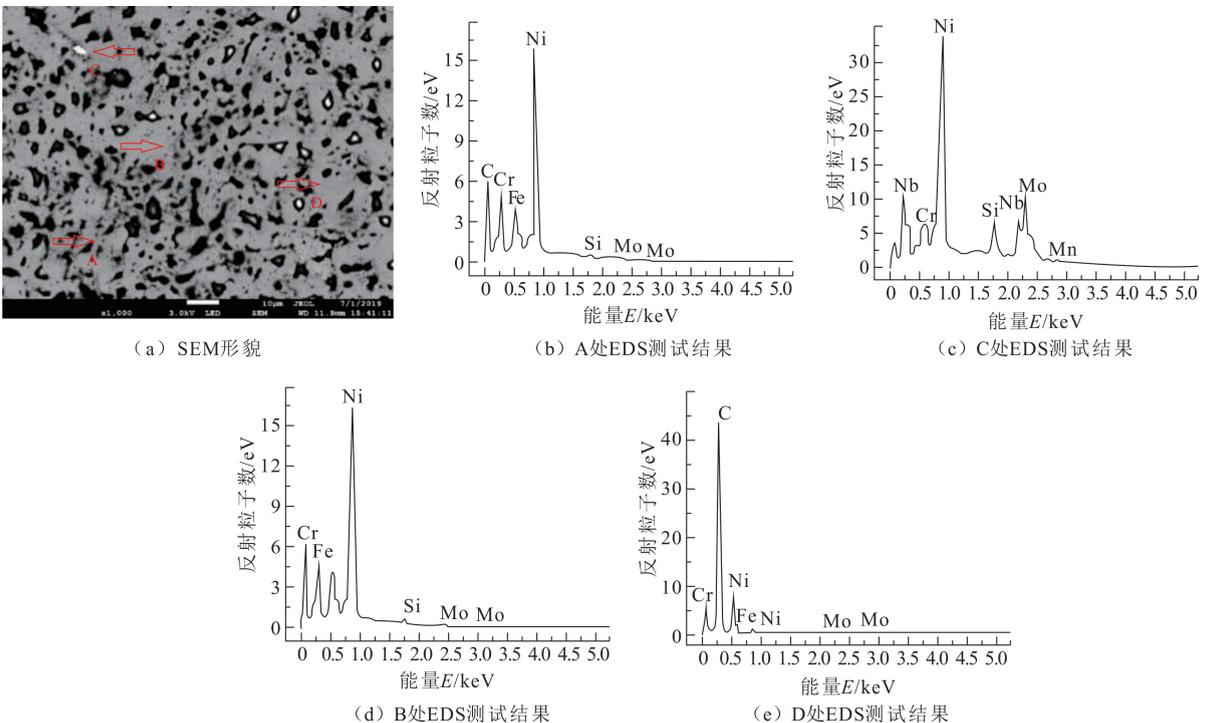


图 8 1# 试样焊缝区 SEM 及 EDS

Fig. 8 SEM and EDS of 1# sample welded area

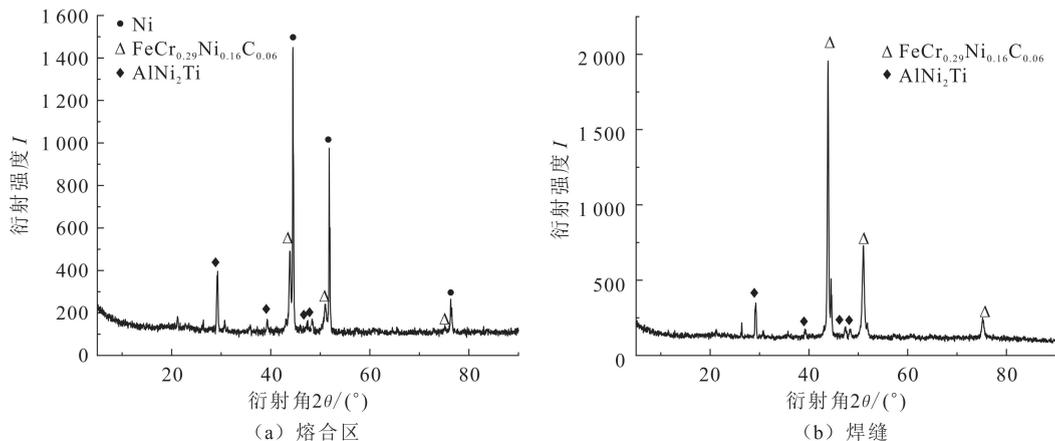


图 9 5#试样焊接接头 XRD 衍射图谱

Fig. 9 XRD diffraction pattern of 5# sample welding joint

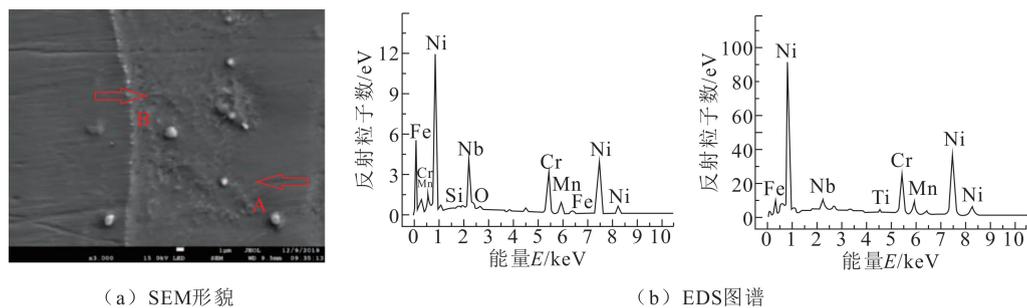


图 10 5#试样焊缝区 SEM 及 EDS

Fig. 10 SEM and EDS of 5# sample welded area

3 结论

(1) 采用 TIG 焊接 6mm 厚镍基泡沫金属板时, 焊接工艺对焊缝成形性有较大影响。当选用 Inconel625 焊丝, 焊接电流为 60 A, 焊前预热为 150 °C, Y 形坡口, 间断填丝的工艺时, 所得到的焊接接头力学性能最优, 抗拉强度可达 21.37 MPa, 约为母材的 96.0%。

(2) 使用 Inconel625 和 Inconel600 焊丝得到的接头组织类似。焊缝表面为均匀细小的等轴晶, 焊缝中部组织主要为等轴晶和树枝晶。在焊层交界处, 由下层焊道至上层焊道组织依次表现为胞状树枝晶→胞状晶→等轴晶; 而在熔合区由靠近母材处至焊缝内部, 组织变化表现为平面晶→胞状晶→树枝晶。

(3) 工艺参数选择合适时, 断口主要为韧窝; 而工艺选择不合适时, 断口形貌为沿晶脆性断裂, 且断口表面存在以碳化物和其他非金属夹杂物为主的第二相质点。采用 Inconel625 与 Inconel600 两种焊丝得到的焊接接头熔合区的主要物相为 γ 相, 使用 Inconel625 焊丝时, 焊缝区以 $\text{Cr}_2\text{Fe}_{6.7}\text{Mo}_{0.1}\text{Ni}_{1.3}\text{Si}_{0.3}$ 为主, 使用 Inconel600 焊丝时, 焊缝区以

$\text{FeCr}_{0.29}\text{Ni}_{0.16}\text{C}_{0.06}$ 为主。

参考文献:

- [1] 董长银, 周博, 宋洋, 等. 天然气水合物储层防砂介质挡砂模拟试验与评价方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(5): 79-88.
DONG Changyin, ZHOU Bo, SONG Yang, et al. Sand-retaining simulation experiment of screen media for formation sand in natural gas hydrate reservoirs and evaluation method[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(5): 79-88.
- [2] 廖华林, 董林, 牛继磊, 等. 砾石充填条件下筛管堵塞与冲蚀特性试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(3): 90-97.
LIAO Hualin, DONG Lin, NIU Jilei, et al. An experimental study on plugging and erosion failures of sand screen in grave-packing conditions[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(3): 90-97.
- [3] 齐宁, 刘帅, 李柏杨, 等. 可脱离式充填筛管用降解剂的研制及降解机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 87-93.
QI Ning, LIU Shuai, LI Boyang, et al. Design and per-

- formance of degradation agent for detachable filling screen tubes in oilfield sand control[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)* 2016, 40(6):87-93.
- [4] 董长银, 贾碧霞, 刘春苗, 等. 机械防砂筛管挡砂介质堵塞机制及堵塞规律试验[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2011, 35(5):82-88.
DONG Changyin, JIA Bixia, LIU Chunmiao, et al. Blocking mechanism and blocking laws experiments of sand retention media in mechanical screen[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2011, 35(5):82-88.
- [5] BAO Z, NIU Z, JIAO K. Gas distribution and droplet removal of metal foam flow field for proton exchange membrane fuel cells [J]. *Applied Energy*, 2020, 116011(280):1-11.
- [6] NOWACKI J, MORANIEC K. Welding of metallic AlSi foams and AlSi-SiC composite foams [J]. *Archives of Civil & Mechanical Engineering*, 2015, 15(4):940-950.
- [7] HANGAI Y, KAMADA H, UTSUNOMIYA T, et al. Aluminum alloy foam core sandwich panels fabricated from die casting aluminum alloy by friction stir welding route [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(9):1928-1934.
- [8] 曹海杨, 张敏, 陈长军, 等. 泡沫铝材料的 CO₂ 气体保护焊接工艺及性能研究 [J]. *表面工程与再制造*, 2016, 16(3):16-19.
CAO Haiyang, ZHANG Min, CHEN Changjun, et al. Study on CO₂ gas shielded welding technology and properties of aluminum foam [J]. *Surface Engineering & Remanufacturing*, 2016, 16(3):16-19.
- [9] HUANG H, SHANGYU H, YONGCHAO Y, et al. Microstructure and mechanical properties of Cu joints soldered with a Sn-based composite solder, reinforced by metal foam [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 845:1-7.
- [10] KARAN S V, SANJAY K P, MONDALDP. Compressive deformation behavior of closed cell LM-13 aluminum alloy foam using finite element analysis [J]. 2020, 28(Pt 2):1073-1077.
- [11] CHANGDAR A, CHAKRABORTY S S. Laser processing of metal foam-a review [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 61:208-225.
- [12] MARX J, RABIEI A. Study on the microstructure and compression of composite metal foam core sandwich panels [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2020, 51(10):5187-5197.

(编辑 沈玉英)