

引用格式:马照伟,刘甲,崔永杰,等. BFe10-1-1合金 K-TIG 焊接接头的组织和性能[J]. 热加工工艺, 2024, 53(15): 112-114+120.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20223546
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

BFe10-1-1 合金 K-TIG 焊接接头的组织和性能

马照伟, 刘甲, 崔永杰, 董闯闯, 张亚龙, 郁炎, 胡伟民

(中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471039)

摘要:采用 Keyhole TIG(K-TIG)焊接工艺开展了 10 mm 厚 BFe10-1-1 铜合金板的焊接试验。结果表明:采用 K-TIG 焊实现了单面焊双面成型,焊缝成型美观,接头焊缝截面无气孔、未熔合、裂纹等缺陷;焊缝区主要为枝晶状 α 组织,由熔合线向焊缝中心生长延伸;母材区和热影响区的组织是孪晶状的 α 相,且热影响区距离焊缝越近,其晶粒尺寸越大。焊缝区的硬度值较高,从焊缝到母材的硬度值先降低再增加,近熔合线的焊缝区和打底焊缝上部区域出现轻微软化。接头平均抗拉强度为 346.5 MPa,断裂位置为母材;在 $\alpha=180^\circ$ 、 $d=4t$ 条件下进行侧弯测试,未发现裂纹。

关键词:BFe10-1-1 合金;K-TIG 焊;微观组织;力学性能;硬度

中图分类号: TG444.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)15-0112-03

Microstructure and Properties of BFe10-1-1 Alloy Plates by K-TIG Welding

MA Zhaowei, LIU Jia, CUI Yongjie, DONG Chuangchuang, ZHANG Yalong,

YU Yan, HU Weimin

(CSSC No. 725 Research Institute, Luoyang 471039, China)

Abstract: The welding test of 10 mm thick BFe10-1-1 copper alloy plate was carried out by using Keyhole TIG (K-TIG) process. The results show that the single-side welding and double-side forming was realized, and the weld forming is beautiful. The weld section is free of porosity, lack of fusion, cracks and other defects. The microstructure of the weld zone is mainly dendritic α , which grows and extends from the fusion line to the weld center. The structure of base metal zone and heat affected zone is twin α phase. The closer to the weld, the larger the grain size of the heat affected zone. The hardness value of the weld zone is relatively high. The hardness value from the weld to the base metal decreases first and then increases. Slight softening occurs in the weld zone near the fusion line and the upper area of the backing weld. The average tensile strength of the joint is 346.5 MPa, and the fracture location is the base metal. The bending test was carried out under the test conditions of $\alpha=180^\circ$ and $d=4t$, and no cracks are found.

Key words: BFe10-1-1 alloy; K-TIG welding; microstructure; mechanical properties; hardness

BFe10-1-1 是常见的铁白铜合金之一^[1],相比于其他的铜合金,其具有良好的防海生物污损性能、耐海水腐蚀性能以及优良的冷热加工性能^[2],被广泛应用于船舶与海洋工程领域的海水管路系统^[3]。在制备 BFe10-1-1 合金管路时,常采用焊接的方式进行管段的连接^[4]。BFe10-1-1 合金常见的焊接方法有钨极氩弧焊、等离子弧焊、摩擦焊等。李莉等^[5]采用钨极氩弧焊进行了 BFe10-1-1 合金管材的焊接,结果显示采用蒙乃尔系列的焊丝可以获得满足力学性

能要求的焊缝,同时也发现 BFe10-1-1 合金的焊缝比较容易产生气孔。高瑞博等^[6]采用等离子弧焊成功地实现了 5 mm 厚 BFe10-1-1 合金的焊接,无需进行金属填充,接头质量良好。张忠科等^[7]开展了 4 mm 厚 BFe10-1-1 合金的搅拌摩擦焊接试验,接头的最高抗拉强度可达母材的 93.8%。

钨极氩弧焊和焊条电弧焊的坡口尺寸较大,自动化程度低,焊接效率较低;等离子弧焊和摩擦焊的焊接厚度有限,难以实现厚度 8 mm 及以上的 BFe10-1-1 合金焊接。K-TIG 焊的电弧能量高,焊接熔深大,可实现中等厚度板材的单面焊接双面成型。本文采用 K-TIG 焊进行 10 mm 厚 BFe10-1-1 合金的焊接,坡口形式为 I 型坡口。先采用大电流 K-TIG 焊完成深熔打底,再采用中低电流 K-TIG 焊对表面

收稿日期:2022-12-20

基金项目:国家重点研发计划项目资助(2021YFB3700700)

作者简介:马照伟(1993-),男,山东聊城人,工程师,硕士研究生,主要从事有色金属焊接方面的研究;

E-mail:mazhaowei725@163.com

进行填丝盖面,焊接后对 K-TIG 焊接 BFe10-1-1 合金接头的外观成型、截面形貌、微观组织、硬度和力学性能进行了测试分析。

1 试验材料和方法

焊接母材为 10mm 厚 BFe10-1-1 铁白铜合金板,坡口形式为 I 型坡口,首先采用大电流 K-TIG 进行深熔打底,无需填充材料;然后采用中低电流

K-TIG 对表面进行填丝盖面。焊材采用 $\phi 1.2\text{mm}$ 的 HSCuNi 焊丝,HSCuNi 焊丝的 Ni 含量约为 30%,可以保证焊缝的强度、改善铁白铜的焊接性、提高焊缝的抗冲刷腐蚀性能。母材和焊材的化学成分如表 1 所示,焊接工艺参数如表 2 所示。对焊接完成的试板进行取样,分别采用 OLYMPUS GX71 金相显微镜、DNS600 材料试验机、BHT5106 弯曲试验机、CV-430DAT 数显维氏硬度计对试样进行宏观组

表 1 母材和焊丝的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of base metal and welding wire (wt%)

材料	主要成分					杂质元素,不大于						
	Cu	Ni	Fe	Mn	Ti	Pb	P	S	C	Si	Zn	Sn
BFe10-1-1	余量	9.0~11.0	1.0~1.5	0.5~1.0	-	0.02	0.006	0.01	0.05	0.15	0.3	0.03
HSCuNi	余量	29.0~32.0	0.4~0.75	0.5~1.0	0.2~0.5	-	0.02	0.01	-	0.15	-	-

表 2 焊接工艺参数
Tab.2 Welding process parameters

层道	打底	盖面
焊接电流 /A	440	200
电弧电压 /V	18~26	14~18
焊接速度 /($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	40	15
送丝速度 /($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	-	1.2

织观察、拉伸性能、弯曲性能和硬度的测试分析。

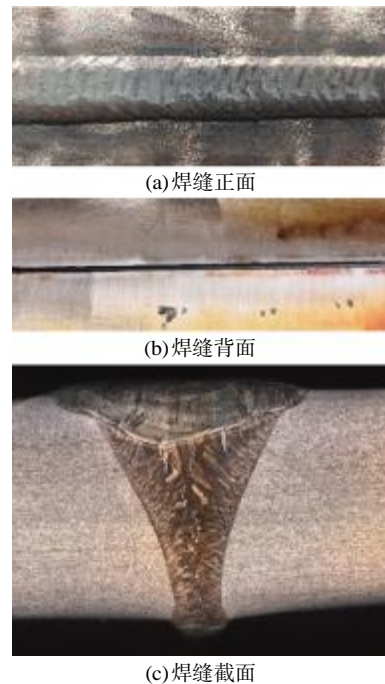
2 试验结果与分析

2.1 宏观焊缝分析

图 1 为 BFe10-1-1 铜合金 K-TIG 焊缝成型。结果显示,采用 K-TIG 焊可实现 10mm 厚 BFe10-1-1 铜合金单面焊接双面成型,焊缝成型美观,表面均匀一致。按 NB/T47013.2-2015 标准要求对焊缝进行射线检测,检测结果满足 NB/T47013.2-2015 I 级要求。接头的截面低倍金相检测未发现气孔、未熔合、裂纹、夹渣等缺陷,焊缝呈“丁”状,具有明显的深熔小孔焊缝形貌特征。K-TIG 焊是在传统 TIG 焊的基础上对电源和焊枪进行改进升级,提高了焊接电源的功率和焊枪的电流负载率,从而大幅提升电弧的能量密度。采用焊接监控相机进行观察,电弧形态如图 2 所示。K-TIG 焊接的电流一般大于 300A,焊接时形成焊接小孔(图 2),熔融金属沿着小孔的侧壁向熔池的后端流动并凝固形成焊缝,从而实现单面焊双面成型。

2.2 微观组织分析

图 3 为接头各区域的显微组织。如图 3 所示,



(a) 焊缝正面
(b) 焊缝背面
(c) 焊缝截面
图 1 焊缝成型
Fig.1 Weld forming



图 2 K-TIG 焊电弧形态
Fig.2 The arc shape of K-TIG welding

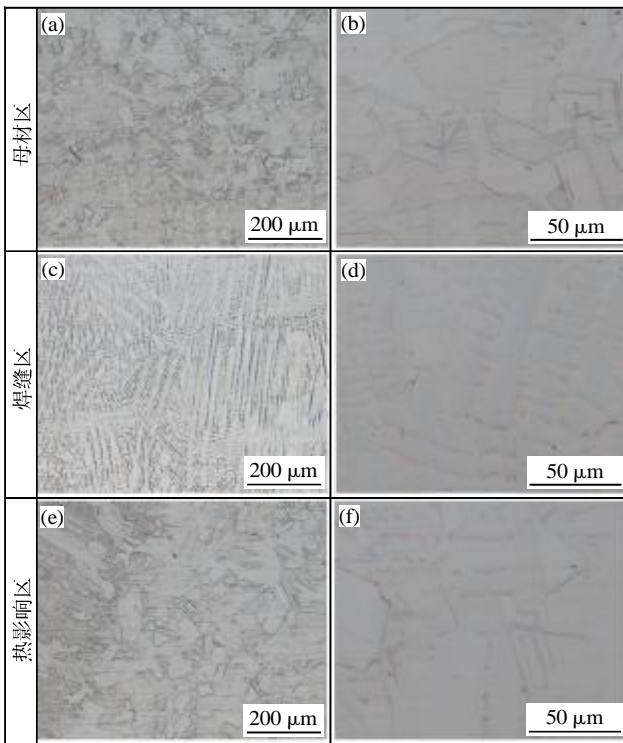


图3 接头各区域的显微组织
Fig.3 Microstructure of each region of the joint

BFe10-1-1 白铜合金基体的组织是呈孪晶状的 α 相,按照 GB/T6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》对晶粒度进行测定,结果显示母材的组织晶粒度为 7.5 级;焊缝区存在大量的枝晶状 α 组织,由熔合线向焊缝中心生长延伸;热影响区的组织是孪晶状 α ,距离熔合线越近的热影响区晶粒尺寸越大,其中近焊缝的热影响组织晶粒度为 5.5 级。采用 K-TIG 焊接 BFe10-1-1 合金时,采用的焊接电流大、焊接热输入高,熔融金属由熔合线开始冷却凝固,晶粒沿着温度梯度最大的方向生长,直至两侧生长的晶粒在焊缝中心线处汇合;距离焊缝越近的热影响区受到焊接热循环的影响越明显,导致了热影响区晶粒尺寸呈现渐变现象。

2.3 硬度分析

对 K-TIG 焊 BFe10-1-1 合金接头进行硬度测试,结果如图 4 所示。如图 4(a)所示,接头焊缝区的竖向硬度最大值为 90HV,位置在盖面层中部区域;打底层上部的区域硬度较低,局部区域的硬度为 70 HV 左右,这是由于打底焊道受到盖面焊的二次热循环作用,导致距盖面焊道较近的打底焊缝柱状晶组织进一步长大,出现一定范围的软化区。如图 4 (b)接头打底层的横向硬度测试结果显示,从焊缝到母材的硬度先降低再增加,焊缝中心处的硬度最高,

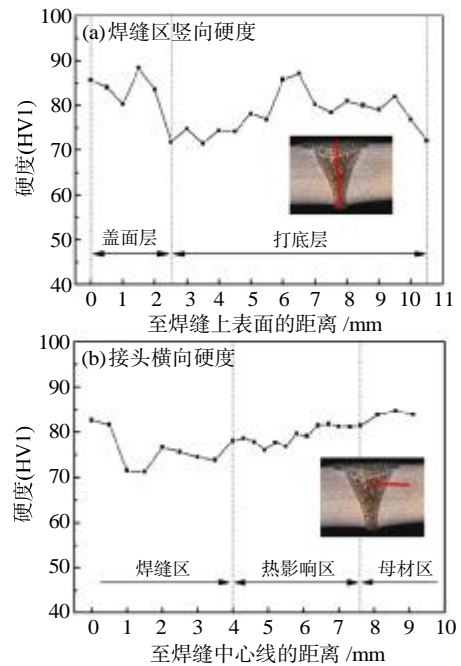


图4 接头的硬度测试结果
Fig.4 Hardness test results of the joint

近熔合线的焊缝处出现低硬度区域。接头的总体硬度值在 70~90HV,硬度波动较小,表明 K-TIG 焊接 BFe10-1-1 合金接头的均匀性良好。

2.4 力学性能分析

表 3 为试样的室温拉伸试验结果,其中,拉伸速度为 2mm/min。结果显示,接头的平均抗拉强度为 346.5MPa,断裂位置发生在母材,力学性能优良,表明 BFe10-1-1 合金 K-TIG 焊接接头的连接强度较高。焊接时采用 HSCuNi 焊丝进行盖面,HSCuNi 焊丝中的 Ni 含量约为 30%,其强度高于 BFe10-1-1 母材,是断裂位置位于母材的主要原因。

表 3 试样的室温拉伸试验结果
Tab.3 Tensile test results of the specimens at room temperature

试样编号	R_m /MPa	断裂位置
1 [#]	349	母材
2 [#]	344	母材

将 4 个弯曲试样在 $\alpha=180^\circ$ 、 $d=4t$ (t 为板厚)条件下进行侧面弯曲检测,试验结果均合格,未发现裂纹产生,表明接头的弯曲性能优良。


3 结论

(1) 采用 K-TIG 工艺实现了 10 mm 厚 BFe10-

(下转第 120 页)

(2) 回火后由于残余应力的降低及碳化物数量、尺寸、形态的变化, S35VN 钢的硬度下降, 强度、塑性提升; 180℃ 回火后硬度均值为 56.5 HRC, 抗拉强度均值为 1844 MPa, 断裂时总应变量均值为 3.89%, 耐腐蚀性能最优。

参考文献:

- [1] Zhu Q N, Li J, Shi C, et al. Effect of quenching process on the microstructure and hardness of high-carbon martensitic stainless steel [J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2015, 24(11):4313-4321.
- [2] Mesquita R A, Barbosa C A. High-speed steels produced by conventional casting, spray forming and powder metallurgy [J]. Trans. Tech. Publications Ltd., 2005, 498:244-250.
- [3] Wei S, Zhu J, Xu L. Research on wear resistance of high-speed steel with high vanadium content [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 404(1/2):138-145.
- [4] Chang K K, Yong C K, Park J I, et al. Effects of alloying elements on microstructure, hardness, and fracture toughness of centrifugally cast high-speed steel rolls [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36(1):87-97.
- [5] Leskovsek V, Ule B. Improved vacuum heat-treatment for fine-blanking tools from high-speed steel M2 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 82(1/3):89-94.
- [6] Wan S, Li H, Tieu K, et al. Mechanical and tribological assessments of high-vanadium high-speed steel by the conventional powder metallurgy process [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(1):943-955.
- [7] Hu L, Ngai T, Peng H, et al. Microstructure and properties of porous high-N Ni-free austenitic stainless steel fabricated by powder metallurgical route [J]. Materials, 2018, 11(7):1058-1068.
- [8] 杨博, 曹睿, 闫英杰, 等. 终轧温度对 S35VN 钢组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2020, 45(11):99-105.
- [9] Krauss G, Repas P E, Gilbert R. Fundamentals of aging and tempering in bainitic and martensitic steel products [C]//Montreal, Quebec, Canada; Iron and Steel Society, 1992.
- [10] Hossain R, Pahlevani F, Sahajwalla V. Stability of retained austenite in high carbon steel-effect of post-tempering heat treatment [J]. Materials Characterization, 2019, 149:239-247.
- [11] Ramona S, Roberto G, Giovanni P, et al. A novel methods for fracture toughness evaluation of tool steels with post-tempering cryogenic treatment [J]. Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2017, 7(3):75-85.
- [12] 沈漪. M390 粉末冶金高速钢的组织与力学性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- [13] Wang M, Flahaut D, Zhang Z, et al. Primary carbide transformation in a high performance micro-alloy at 1000 °C [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 781:751-760.
- [14] Krakhmalev P, Yadroitsava I, Fredriksson G, et al. In situ heat treatment in selective laser melted martensitic AISI 420 stainless steels [J]. Materials & Design, 2015, 87:380-385.
- [15] 王奇, 李晓源, 时捷, 等. 等温球化退火温度对高碳钢组织的影响 [J]. 金属热处理, 2016, 41(11):88-92.
- [16] Liang J, Zhao H. Effects of the austenitizing temperature on the mechanical properties of cold-rolled medium-Mn steel system [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 691:51-59.
- [17] Cheng L, Zhou J, Zhang X, et al. Effect of heat treatment on microstructure and impact toughness of a tungsten-molybdenum powder metallurgical high-speed steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 815:141268-141278.
- [18] Wang L, Dong C, Yu Q, et al. The correlation between the distribution/size of carbides and electrochemical behavior of 17Cr-1Ni ferritic-martensitic stainless steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(1):388-400. 

(上接第 114 页)

1-1 铜合金的单面焊双面成型, 焊缝接头低倍金相无气孔、未熔合、裂纹等缺陷。

(2) 焊缝区主要是枝晶状 α 组织, 由熔合线向焊缝中心生长延伸; 母材区和热影响区的组织是孪晶状的 α 相, 近焊缝的热影响区晶粒尺寸较大。

(3) 焊缝区的硬度值较高, 从焊缝到母材的硬度先降低再增加, 近熔合线的焊缝区和打底焊缝上部区域出现轻微软化。

(4) 接头平均抗拉强度为 346.5 MPa, 断裂位置为母材; 在 $\alpha=180^\circ$ 、 $d=4t$ 的条件下进行侧弯测试, 未发现裂纹。

参考文献:

- [1] 罗皓, 刘甲, 崔永杰, 等. BFe10-1-1 合金 PAW 接头组织和性能研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48(23):140-142.
- [2] 李升燕. BFe10-1-1 白铜管扩径的力能预测模型及形变规律研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2019.
- [3] 陈宁宁. 船用 BFe10-1-1 铜镍合金管材弯曲成形有限元分析及实验研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [4] 晏阳阳, 廖志谦, 刘希林, 等. B10 合金薄板 PAW 焊接工艺研究 [J]. 材料开发与应用, 2011, 26(1):4-6.
- [5] 李莉, 邓洪军. BFe10-1-1 白铜焊接工艺的研究 [J]. 沈阳工业大学学报, 2007(1):32-34.
- [6] 高瑞博, 樊科社, 吴江涛, 等. BFe10-1-1 白铜等离子弧焊工艺研究 [J]. 焊接技术, 2022, 51(10):50-53.
- [7] 张忠科, 郑江辉, 赵早龙, 等. BFe10-1-1 白铜 FSW 接头组织和力学性能研究 [J]. 热加工工艺, 2021, 50(7):31-36. 