

引用格式:田永武,郑申清,李渤渤,等. 705C 锆合金厚板 GTAW 焊接工艺研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(21): 99-101+117.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20212386
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

705C 锆合金厚板 GTAW 焊接工艺研究

田永武, 郑申清, 李渤渤, 李伟东, 杨学东, 刘茵琪

(洛阳双瑞精铸钛业有限公司, 河南 洛阳 471000)

摘 要:在分析锆合金焊接性的基础上,采用手工钨极氩弧焊在真空焊箱内对 30 mm 厚的 705C 锆合金厚板进行焊接试验,通过光学显微镜观察、拉伸试验、弯曲试验和硬度试验,分析了焊接接头的组织与力学性能。结果表明:适当增加焊接电流,控制真空度和层间温度等,可以得到较高质量的锆合金厚板焊接接头。焊缝区组织呈细密、小条状 α 相,热影响区组织未严重粗化,其 α 相比焊缝区的稍粗。接头抗拉强度、伸长率分别达到母材 97%、90%以上,弯曲性能合格,接头横截面上的硬度分布未见脆化和硬化现象。

关键词:锆合金;厚板;钨极氩弧焊(GTAW);力学性能

中图分类号: TG441.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2023)21-0099-03

Research on GTAW Welding Technology of 705C Zr Alloy Thick Plate

TIAN Yongwu, ZHENG Shenqing, LI Bobo, LI Weidong, YANG Xuedong, LIU Yinqi

(Luoyang Sunrui Titanium Precision Casting Co., Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: Based on the analysis of Zr alloy weldability, the welding test of 30 mm thick 705C Zr alloy plate was carried out by using manual gas tungsten arc welding in vacuum box. The microstructure and mechanical properties of the welded joint were analyzed by optical microscope observation, tensile test, bending test and hardness test. The results show that by increasing the welding current properly, controlling the vacuum degree and interlayer temperature, the welded joint of Zr alloy thick plate with high quality can be obtained. The microstructure of the weld zone is fine, dense and small strip α phase, the microstructure of heat affected zone is not coarsened seriously, and the α phase is a little coarser than that of the weld zone. The tensile strength, elongation of the joint reaches more than 97%, 90% of the base metal, respectively, the bending property is qualified, and the hardness distribution of the cross section of the joint shows no brittleness and hardening phenomenon.

Key words: Zr alloy; thick plate; gas tungsten arc welding(GTAW); mechanical property

锆及锆合金是一种具有优良耐蚀性的稀有贵金属,对大多数有机酸、无机酸及一些熔盐有非常好的耐蚀性,同时锆在碱中的耐蚀性也优于钛、钽、铌。锆作为一种优秀的化工耐腐蚀结构材料,大大延长了设备的使用寿命,降低了设备的维修费用和停产时间。此外,锆还具有高熔点、高强度、膨胀系数低、热中子吸收截面小等优点,被广泛应用于航空航天、军工、核反应、原子能领域^[1-3]。涉及的锆及锆合金材料主要包括箔材、板材、管材、铸件、锻件等。国内对锆及锆合金的研究主要在耐蚀性、表面改性等方面,对其焊接工艺和性能方面的研究较少,特别是对于 705C 锆合金厚板缺乏成熟的焊接经验。本文主要对 705C 锆合金厚板的焊接性进行研究,确定合适的焊

接工艺参数,形成标准工艺及规范,用于指导生产^[4-5]。

1 锆合金的焊接性分析

锆及锆合金焊接性能良好,通常采用钨极氩弧焊(GTAW)、熔化极氩弧焊(GMAW)、等离子弧焊(PAW)、真空电子束焊(HV-EBW)。锆及锆合金的导热性差,高温停留时间长,冷却速度小,焊接过程中往往出现焊缝组织粗大,热影响区宽大,焊接表面易与氮、氢、氧等气体发生反应,在 315℃ 时吸氢,400℃ 吸氧,生成 ZrO_2 ,当温度超过 800℃ 时吸氮,形成脆性化合物 ZrN ,导致焊接接头塑韧性和抗腐蚀性变差。锆的焊接基本上没有形成裂纹的明显趋势,但焊接过程中容易出现气孔、焊缝表面发蓝等问题。因此,在焊接锆时要选择合理的焊接工艺参数,确保清洁的操作环境,同时避免在焊接过程中受氢、氧、氮等气体杂质的污染,是保证焊接质量的关键^[6-9]。

收稿日期:2021-09-06

作者简介:田永武(1987-),男,河南洛阳人,工程师,硕士,主要从事钛及锆合金材料研究工作;E-mail:672616768@qq.com

2 焊接工艺试验

2.1 试验材料及设备

试板为二次锭通过真空浇铸得到的 705C 锆合金试板,尺寸为 140 mm×180 mm×30 mm,状态为热等静压态,其主要化学成分如表 1 所示,材料满足 ASTM B752-01 标准^[8]。对母材的室温力学性能进行测试,其抗拉强度为 641.5 MPa,断后伸长率为

表 1 705C 锆合金的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of 705C Zr alloy (wt%)

成分	Zr+Hf	Hf	Fe+Cr	H	N	C	O	P	Nb
ASME B 752-01	≥95.1	≤4.5	≤0.3	≤0.005	≤0.03	≤0.10	≤0.3	≤0.01	2.0~3.0
实测成分	余量	1.99	0.05	<0.001	0.009	<0.01	0.199	<0.01	2.21

表 2 ERZr4 焊丝的化学成分(质量分数,%)
Tab.2 Chemical composition of ERZr4 welding wire (wt%)

Hf	Fe + Cr	H	N	C	O	Nb	Zr + Hf
1.97	0.0498	<0.001	0.01	<0.010	0.117	2.88	余量

2.2 焊前准备

焊接前,采用化学酸洗和机械打磨相结合的方法对锆合金试块待焊接区域两侧、焊接坡口及焊丝表面上的氧化物、油污、水分等杂质进行清除,并放置到 150~200℃的烘干箱内保温。坡口形式和尺寸如图 1 所示。

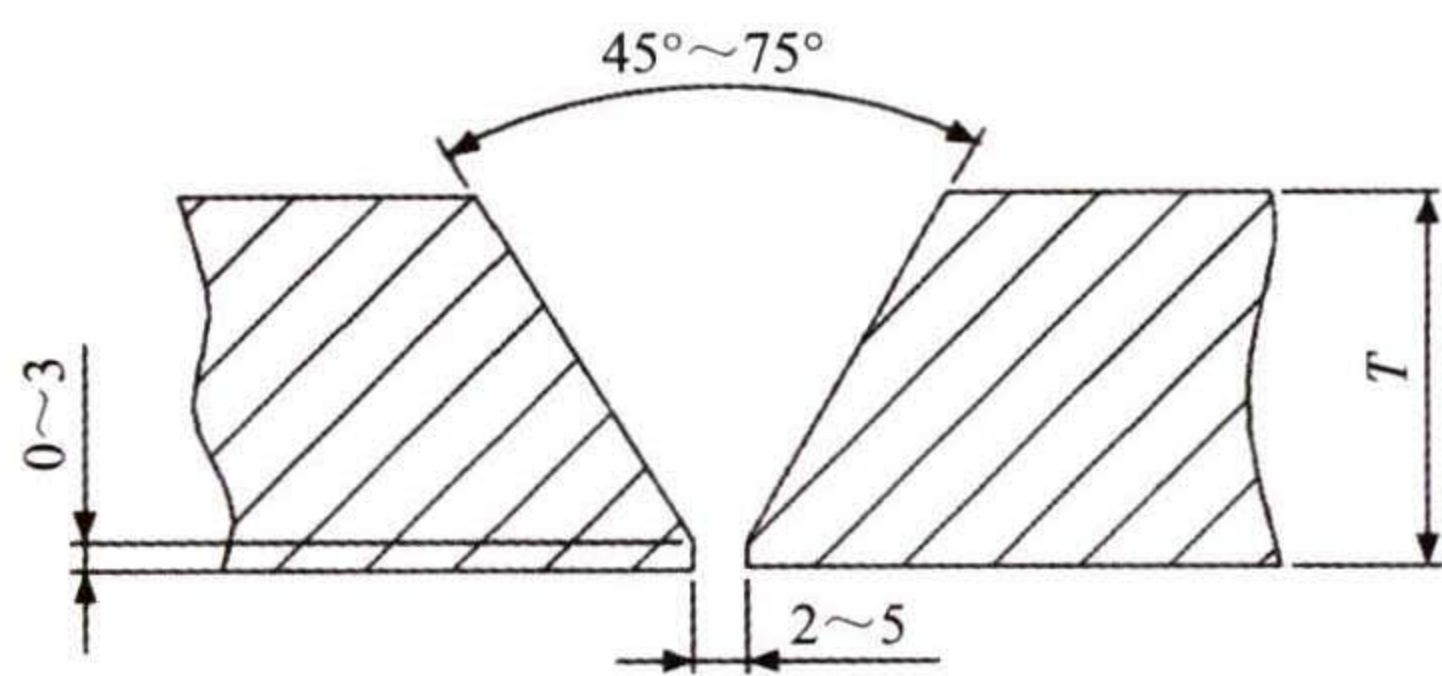


图 1 坡口形式和尺寸(mm)
Fig.1 Groove type and dimensions (mm)

2.3 焊接试验工艺

本次试验在真空焊箱内进行手工钨极氩弧焊,焊后进行热处理,工艺为 820℃保温 2h,炉冷。由于试板较厚,对焊缝的力学性能要求较高,采用多层焊

20.5%。

在焊接开始前,对锆合金试板待焊面采用粗砂纸打磨,并经过化学酸洗(10%HF,45%HNO₃,其余蒸馏水)、表面清油污、烘干。焊接设备为 Panasonic YC-400TX 电焊机,真空焊箱为 ZKHX1200 真空焊箱。根据 ASME IX 规定,焊丝采用 $\phi 2.0$ mm 的 ERZr4 焊丝,化学成分见表 2。

接,并适当增加焊接电流,不仅可增大焊缝熔深,提高焊缝强度,也可增加熔滴的过渡频率,使熔滴阶段的时间缩短,焊缝的含氮量下降。保护气为氩气,纯度为 99.999%,真空度不高于 0.63 Pa,层间温度小于 70℃。同时采用短弧焊来减少焊缝含氧量。焊接参数如表 3 所示。

表 3 GTAW 工艺参数
Tab.3 GTAW process parameters

焊层	钨极直径 /mm	焊接电流 /A	焊接速度 /(mm·min ⁻¹)
打底	3.0	110	45~65
填充	3.0	200	60~100
盖面	3.0	150	90~120

3 试验结果与分析

3.1 金相组织

从焊后试板垂直于焊缝方向截取试样,用 ZEISS Observer Z1.m 金相显微镜对焊缝及热影响区进行分析。金相试样经抛光后用氢氟酸和硝酸(1:3)的混合水溶液腐蚀后观察其金相组织,如图 2 所示。由图 2(b)、(c)可看出,焊缝区组织呈细密、小条状 α 相,热影响区组织未严重粗化,其 α 相比焊缝区的稍粗,说明焊接温度控制得较好,避免了高温保持时

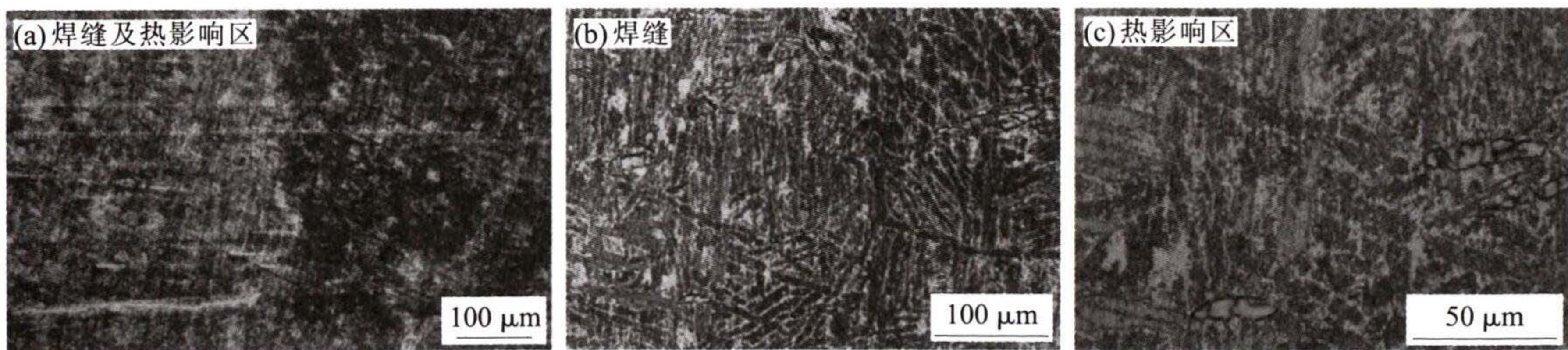


图 2 焊接接头各区的显微组织
Fig.2 Microstructure of each region of the welded joint

间过长,抑制了晶粒长大。

3.2 力学性能测试

焊后对焊缝表面进行渗透探伤及 γ 射线探伤检测。结果表明,焊缝表面和内部无缺陷。对焊缝进行切样做室温拉伸试验、侧弯试验、硬度测试。焊接接头的拉伸性能如表 4 所示,拉伸测试后试样如图 3 所示。

表 4 焊接接头的室温拉伸性能
Tab.4 Tensile properties of the welded joint at room temperature

编号	抗拉强度 /MPa	断后伸长率(%)	破坏位置
1 [#]	629	18.0	焊缝
2 [#]	627	19.0	焊缝

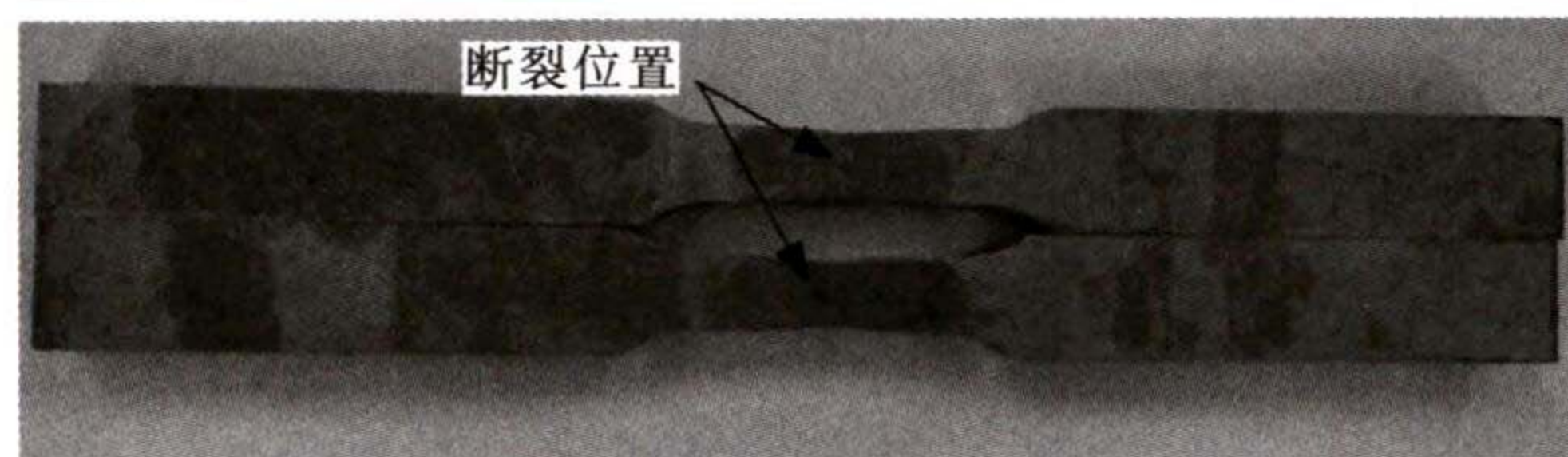


图 3 拉伸测试后试样
Fig.3 Samples after tensile test

室温拉伸试验结果表明,断裂位置在焊缝处。由于试板厚度较大,焊接过程中熔池热量集聚多,高温停留时间长,冷却速度缓慢,造成焊缝处晶粒粗大。但焊接接头的平均抗拉强度(628 MPa)远超过母材规定的最小抗拉强度(483 MPa),接头强度达到母材的97%以上,平均伸长率为 18.5%,达到母材的 90%以上,满足使用要求。

侧弯试样厚度为 30 mm,试验条件为 $\alpha=180^\circ$, $d=10t$ ($t=30$ mm),共测试 4 件试样,侧弯试验后试样如图 4 所示。结果表明,焊接接头经过 180° 弯曲后,受拉面完好无裂纹,合格。

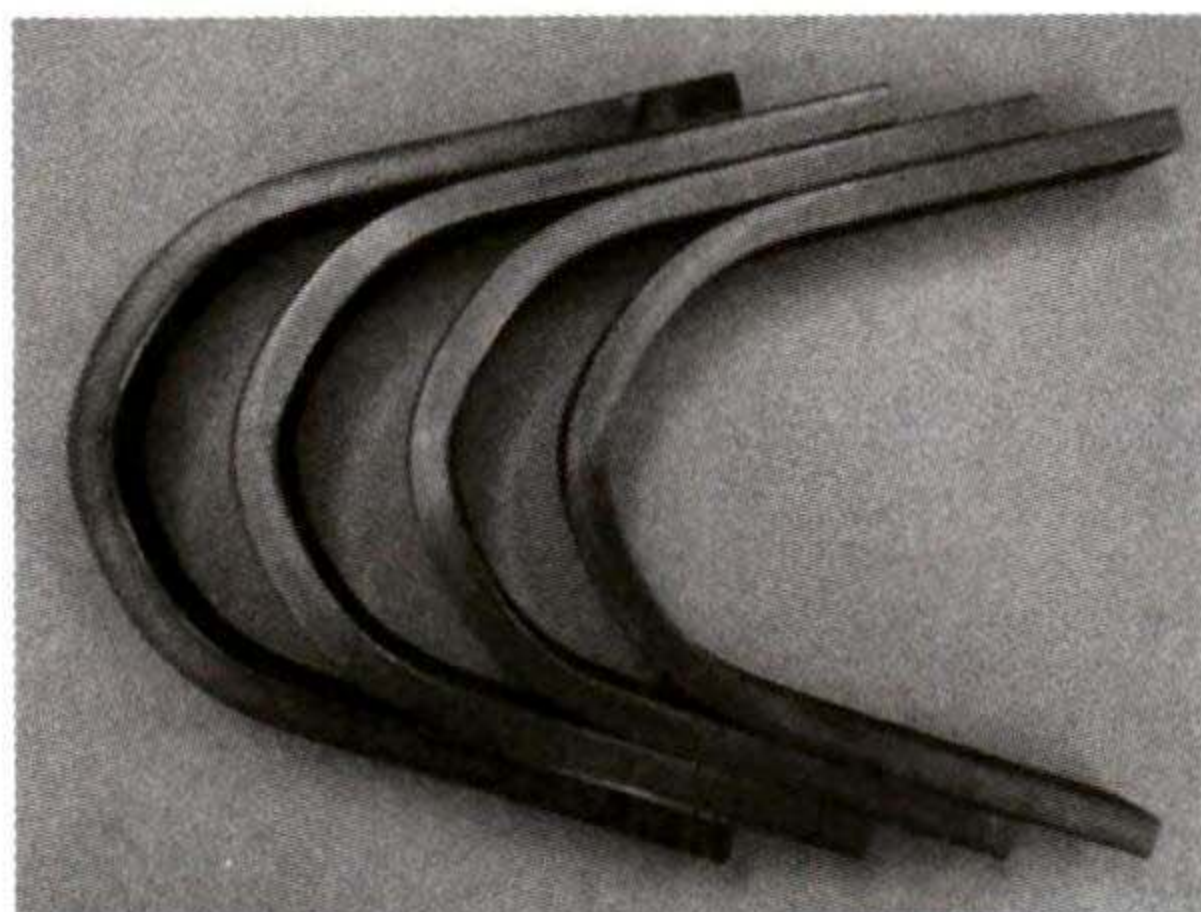


图 4 侧弯试验后试样
Fig.4 Samples after side bending test

采用洛氏硬度计(FRC-3E),对焊接接头截面焊缝区、两侧熔合线、两侧热影响区和母材区各取 3 个点,共 18 个点进行洛氏硬度测试,取平均值。测试位

置如图 5 所示,焊接接头横截面不同区域的硬度如表 5 所示。可以看出,熔合线硬度最大,然后是热影响区、母材,焊缝区硬度最小。这是由于待焊区较宽需要多道焊接,焊接方向从中间向两边焊接,两边的焊接过程相当于对中间焊缝进行了一次回火,晶格畸变程度降低,应力减弱同时位错密度相对减少造成的。热影响区相对于母材受到更多的热输入,高温停留时间较长,造成晶粒较粗大,硬度相对于母材稍大一些。分析可见,焊接接头未受到因气体污染导致的脆化和硬化现象。

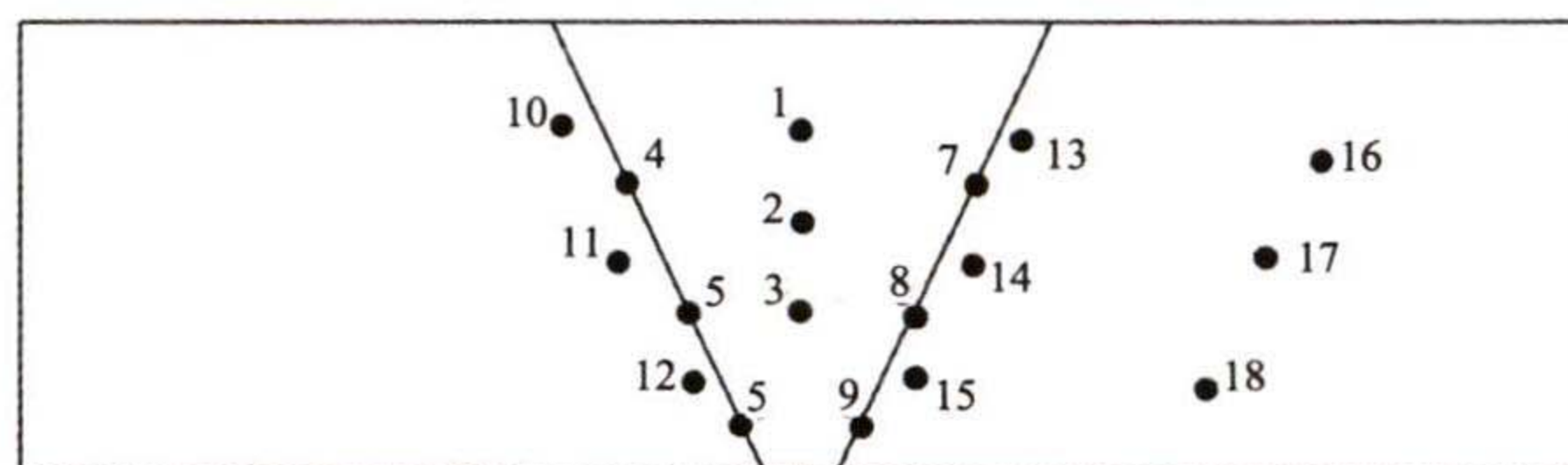


图 5 测硬度选取位置
Fig.5 Hardness selection position

表 5 焊接接头横截面的平均硬度(HRC)
Tab.5 Average hardness of cross section of the welded joint (HRC)

检测位置	硬度平均值
焊缝区	14.1
熔合线	18.8
热影响区	16.5
母材	15.4

4 结论

(1) 通过对 705C 铝合金的焊接性分析,采取在真空焊箱内进行手工钨极氩弧焊,适当增加焊接电流,控制真空度和层间温度等,获得了成形良好的铝合金焊接接头。

(2) 接头焊缝区组织呈细密小条状 α 相,热影响区的 α 相仅比焊缝区的稍粗,说明焊接温度控制得较好,避免了高温保持时间过长,抑制了晶粒长大。

(3) 焊接接头的平均抗拉强度为 628 MPa,平均伸长率为 18.5%,分别达到母材的 97%、90%以上,侧弯性能合格,接头横截面上的硬度分布显示未见脆化和硬化现象,各项性能均满足使用要求。

参考文献:

- [1] 赵文宝,周邦新,苗志,等. 我国高性能铝合金的发展[J]. 原子能科学技术,2005(7): 20-23.

(下转第 117 页)

理后,其硬度达到最大值 101.6HV,提升效果显著,导电率也处在较高水平,为 56.0%IACS,综合性能匹配最好。

2.2 轧制变形对合金组织的影响

不同变形量冷轧+时效处理合金的显微组织如图 3 所示。由图 3 可见,未经冷轧变形的 Al-Mg-Si-Sr-B 合金经 160℃×4h 时效处理后组织为均匀的等轴晶组织,在晶粒内及晶界处有弥散细小的第二相分布。经冷轧变形后再进行时效处理的合金,晶粒沿着轧制方向被明显拉长,随着变形量的

增加,合金中晶粒被拉长趋势加剧,沿轧制方向逐渐呈纤维状。当轧制变形量达到 80%时,合金组织中晶粒已完全破碎,组织完全呈纤维状。根据金相组织可知,合金冷轧后进行 160℃时效处理,合金组织仍保留轧制态纤维状组织形貌,变形组织的晶界周围分布着大量弥散的颗粒状析出相。由此说明此时效温度较低,合金在此温度下时效并未发生再结晶,组织仍保留变形组织形貌,形变强化作用仍被保留,再加上时效析出强化相的强化效果,将使合金强度显著提高。

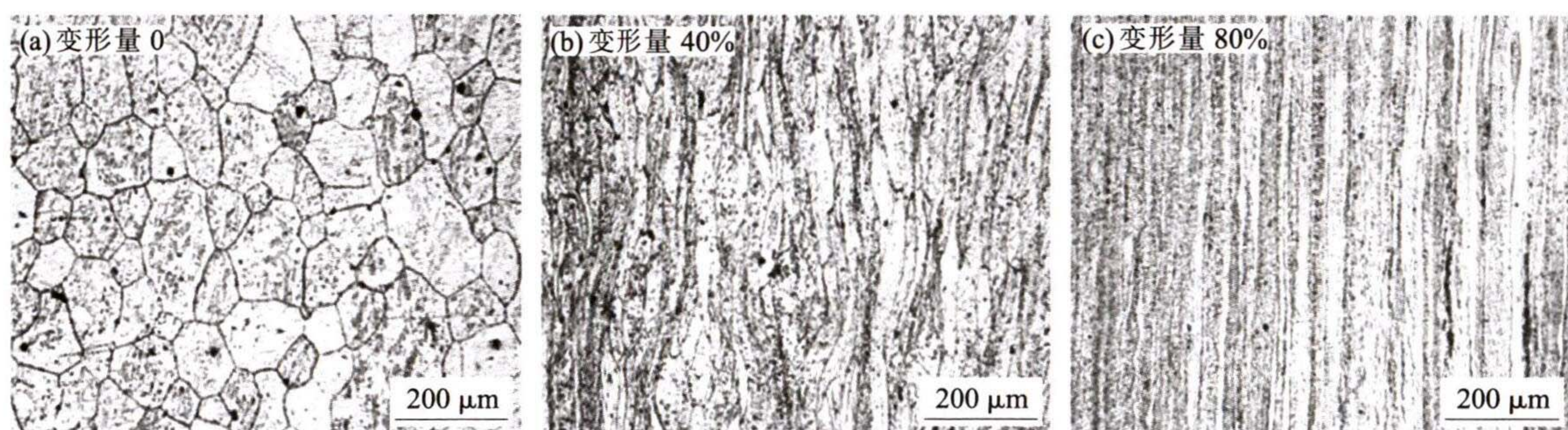


图 3 不同变形量冷轧+时效处理合金的显微组织

Fig.3 Microstructure of the alloy with different deformation cold rolling + aging treatment

3 结论

(1) 不同变形量冷轧的 Al-Mg-Si-Sr-B 合金经 160℃×4h 时效处理,随着轧制变形量的增加,合金的硬度逐渐提高,导电率先降低后升高。冷轧变形 80%的合金硬度达到最大值 101.6HV,其导电率为 56.0%IACS,综合性能匹配最好。

(2) 不同变形量冷轧的 Al-Mg-Si-Sr-B 合金经 160℃×4h 时效处理,合金保留轧制态纤维状组织形貌,并未发生再结晶。冷轧变形量达到 80%时,合金组织中晶粒完全破碎,组织完全变成纤维状形貌。

参考文献:

[1] 张瑞峰,董亚光,谭瑞,等. 混合稀土对架空导线用 6101 铝合金铸态组织的影响[J]. 河南科技,2016,31(17):124-125.

[2] 祝志祥,韩钰,陈新,等. 架空线路用高导电率耐热铝合金导线的研制[J]. 中国电力,2014,47(6):66-69.
[3] 孙金城,范利. 高强铝合金导线均匀化处理工艺研究[J]. 热加工工艺,2021,50(4):121-123.
[4] 韩茜,李英,田明辉,等. 退火工艺对 8030 铝合金导线组织和性能的影响[J]. 热加工工艺,2020,49(18):124-127.
[5] 王海生,闵洁,王鸿钧. 含 Zr,Ce 稀土元素铝合金导线的微结构与导电性能研究[J]. 稀有金属,2020,44(7):716-721.
[6] 余倩,谢竹君,李镜. 稀土铝合金导线的合金化与性能研究[J]. 铸造技术,2018,39(7):1431-1435.
[7] 王宏颖. 退火处理对高导耐热铝合金导线组织和性能的影响[J]. 热加工工艺,2019,48(24):141-143.
[8] 张俭. 冷拔变形与热处理制备 Al-Sc-Zr 合金导线的研究[D]. 沈阳:东北大学,2015.
[9] 罗雪梅,余虹云,李瑞,等. 拉拔和轧制变形铝导线的结构演化及力学与导电性能[J]. 材料研究学报,2018,32(5):357-364. H

(上接第 101 页)

[2] 赵文金. 核工业用高性能锆合金的研究[J]. 中国材料进展,2004(5):12-15.
[3] 郝峰波,李晴,李鹏飞. 锆的焊接特性与工艺性[J]. 焊工之友,2013(1):54-56.
[4] 赵忠民,张立新. 关于锆材的焊接[J]. 焊接技术,2003,32(3):20-21.
[5] 周辰琳,高磊,张莹莹. 锆 R60702 焊接工艺试验[J]. 焊接技术,2012,41(12):34-35.
[6] 《ASME 锅炉及压力容器规范(国际性规范)》第九卷:焊接和

钎接工艺,焊工、钎接工、焊接和钎接操作工评定标准(2007 版)[S]. 北京:中国石化出版社,2007.
[7] 雷鸣,刘文庆,严青松. 变形及热处理对 Zr-Sn-Nb 新锆合金第二相粒子的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2007,36(3):467-470.
[8] 胡效东,姜迪,李亚江. 工业纯锆焊缝金相组织和力学性能[J]. 西南交通大学学报,2014(5):862-868.
[9] 赵珍祥. 锆及锆合金管道焊接技术探讨[J]. 化工设备与管道,2009(3):52-55. H