

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.3277

钨极氩弧焊焊接对 ZrTiNb 合金焊接组织和力学性能的影响

吴 洋, 苏宝龙, 袁睿豪, 李金山

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要: 锆合金因其优良的耐腐蚀性能, 常用于制造核工业器件, 受到研究者广泛关注。采用钨极氩弧焊作为焊接方法, 使用 ZrTiNb 合金作为焊接材料, 分别焊接了 5、10、20 mm 3 种尺寸的焊样。所得焊接接头焊缝区微观组织为粗大的片层集束和少量的篮网状魏氏组织, 组织形态与冷却速率相关; 熔合区微观组织为较小的魏氏体晶粒, 其与热影响区存在明显的分界线; 热影响区微观组织为不规则锯齿状等轴 α 相晶粒; 母材区微观组织为铸态 α 等轴晶粒。随着焊缝距离增加, 晶粒尺寸呈现递减趋势。对焊缝进行了力学性能测试, 结果表明, 随着试样厚度增加, 其塑性延伸强度、抗拉强度呈现先增加后下降的趋势, 并在 20 mm 的厚度下出现明显下降。10、20 mm 样品断后伸长率与断面收缩率相对于 5 mm 试样呈现增加的趋势, 但 10 mm 和 20 mm 样品性能相近。

关键词: 锆合金; 钨极氩弧焊; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG113.25; TG146.4+14

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)06-0543-08

Influence of Tungsten Inert Gas Welding on the Microstructure and Mechanical Properties of ZrTiNb Alloy Weldments

WU Yang, SU Baolong, YUAN Ruihao, LI Jinshan

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Zirconium alloys are commonly used for manufacturing nuclear industry parts and have been widely studied by scientists because of their excellent corrosion resistance. Samples with sizes of 5, 10, and 20 mm were welded via tungsten inert gas welding, and ZrTiNb was used as the welding material. The microstructure of the weld zone is a coarse layer bundle and a small amount of basket-weave widmanstätten structure, which is related to the cooling rate. The microstructure of the fusion zone is composed of smaller widmanstätten grains, which have a clear boundary with the heat-affected zone. The microstructure of the heat-affected zone consists of irregularly serrated equiaxed α phase grains. The microstructure of the base material consists of the as-cast α equiaxed grains. As the distance from the weld zone increases, the grain size decreases. Then, the mechanical properties were tested, and the results show that as the thickness of the sample increased, the plastic extension strength and tensile strength first increases and then decreases, especially a significant decrease at a thickness of 20 mm. The elongation and reduction in the area after fracture of the 10 and 20 mm samples are similar but show an increasing trend compared to those of the 5 mm samples. This article characterizes the microstructure and mechanical properties of ZrTiNb, providing necessary data to support its engineering applications.

Key words: zirconium alloy; tungsten inert gas welding; microstructure; mechanical property

锆是稀有金属, 熔点为 1 852 °C, 其具有密度适中, 强度优良, 膨胀系数低, 弹性模量小等特点。锆及锆合金具有优异的抗腐蚀能力、良好的力学性能和耐高温性能^[1-3], 在微观方面, 具有小的热中子吸

收截面的特点, 对 2 200 m/s 的中子, 纯锆的俘获截面只有 $0.18 \times 10^{-28} \text{ m}^2$ 。另外, 对于大多数常用的化学溶液, 如有机、无机酸, 强碱及一些熔融盐等, 锆合金均展现出了极高的耐蚀性能。因此, 锆合金被广泛用于

收稿日期: 2023-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(U2067217); 国家乏燃料后处理专项项目

作者简介: 吴 洋, 2001 年生, 硕士生。研究方向为钛合金图像分析处理。Email: wuyang99@mail.nwpu.edu.cn

通讯作者: 苏宝龙, 1999 年生, 硕士。研究方向为高温钛合金高温性能。Email: subaolong@mail.nwpu.edu.cn

引用格式: 吴洋, 苏宝龙, 袁睿豪, 李金山. 钨极氩弧焊焊接对 ZrTiNb 合金焊接组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2024, 45(6): 543-550.

WU Y, SU B L, YUAN R H, LI J S. Influence of tungsten inert gas welding on the microstructure and mechanical properties of ZrTiNb alloy weldments[J]. Foundry Technology, 2024, 45(6): 543-550.

制造如燃料溶解器、换热器、塔器、反应釜等在高腐蚀性条件使用的器件^[5-7],其中ZrTiNb是应用于乏燃料后处理的新兴合金。

锆合金器件、设备应用于乏燃料后处理时不可避免地需要进行焊接加工。锆及锆合金的焊接方法主要取决于生产流程、接头的尺寸、类型、质量要求和经济可行性。但由于锆及锆合金高温化学活性较高,在焊接过程中易与空气中的 H_2 、 O_2 、 N_2 等气体发生反应^[9-11],因此在锆合金焊接中最常用的焊接方式为具有保护氛围的钨极氩弧焊(tungsten inert gas welding, TIG)^[12]。但是其焊接过程需要较高的焊接热输入,从而导致晶粒粗化、机械性能降低,以及焊接接头耐腐蚀性下降,且过大的焊接电流会导致钨极熔化,易造成焊缝夹钨^[13-15]。目前多数研究集中于焊接接头微观组织及力学性能方面,李宁等^[6]采用静态等温失重法研究了Zr-702焊接接头的耐腐蚀性,在硫酸介质中焊接接头的腐蚀速率大于母材区,其腐蚀方式以电偶腐蚀和氢腐蚀联合作用的局部腐蚀为主;Kim等^[17]采用TIG焊对纯锆同质异质焊接后力学性

能进行研究,揭示了焊接性能与组织和力学性能的关系。锆合金的焊接接头直接决定了焊件的性能,对锆合金焊接接头的微观组织及力学性能研究具有重要作用。

本文以不同厚度的轧制ZrTiNb合金板材为对象,探究其TIG焊后焊接接头的力学性能及微观组织,为ZrTiNb合金在工程应用中提供必要的技术支持。

1 实验材料与方法

1.1 试样制备

实验选用厚度分别为5、10、20 mm,尺寸为630 mm×380 mm的ZrTiNb合金,供货态为再结晶退火,其中不同厚度板材焊接坡口形式见图1。试样采用TIG焊接,焊接V型坡口角度为 60° ,焊道层数为2层。

1.2 试样表征

将焊接后的板材经过切割制成拉伸试样,使拉伸试样中心为焊缝中心。拉伸试样具体参数见图2,其中5、10、20 mm试样依照国标(GB/T288.1-2021)

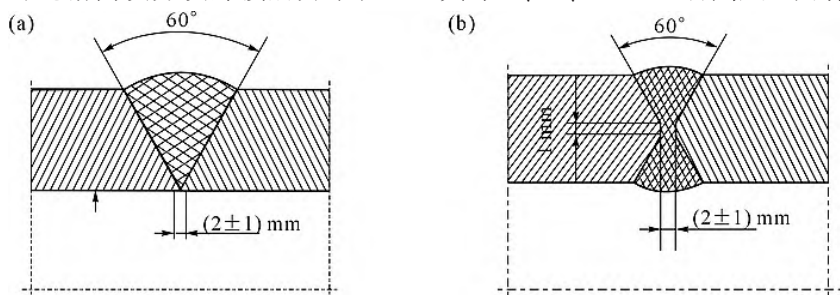


图1 焊接坡口形状与尺寸:(a) 5 mm/10 mm 焊接坡口;(b) 20 mm 焊接坡口

Fig.1 Shape and size of the welding groove: (a) 5 mm/10 mm welding groove; (b) 20 mm welding groove

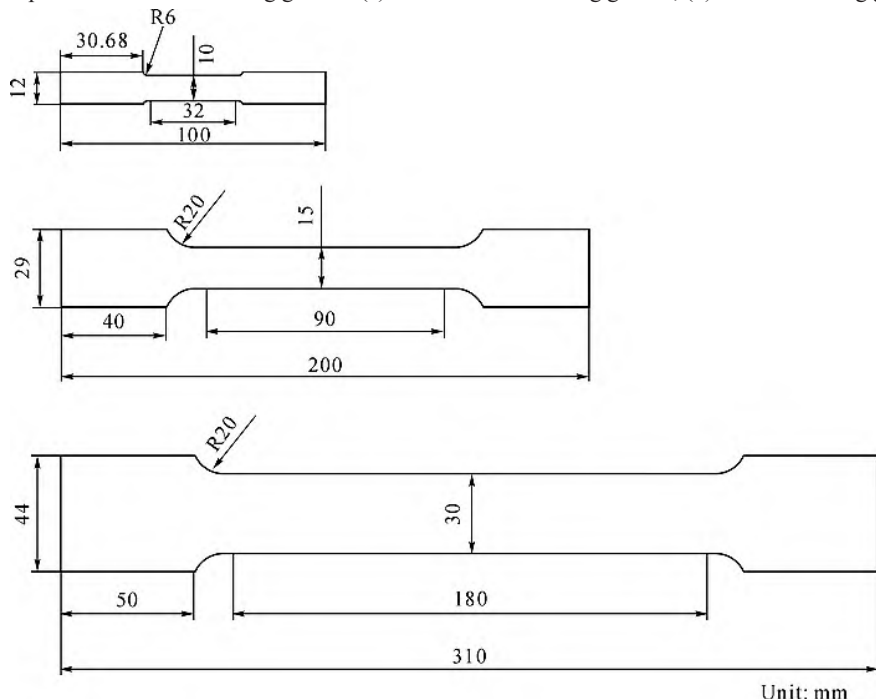


图2 不同厚度试样加工尺寸

Fig.2 Processing dimensions of specimens with different thicknesses

设计,在室温下测试接头的拉伸性能,得到接头的塑性延伸强度、抗拉强度、断后伸长率、断面收缩率等力学指标。为保证测试结果的可靠性,从每块板材中取出3个拉伸试样作为平行对照。

焊后试样按轴向切开,并以焊缝为中心线,取样进行扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)和电子背散射衍射(electron backscattered diffraction, EBSD)分析,通过碳化硅砂纸(80#、400#、800#、1000#、1500#、2000#)依次打磨,将打磨后的试样,在抛光液配比为60%甲醇、5%高氯酸和35%正丁醚(体积分数)的溶液中电解抛光15~20 s。电解液温度为0~10℃,电压20~30 V。

2 实验结果与分析

2.1 ZrTiNb合金焊后微观组织

图3为板材厚度5 mm试样的SEM图像,经钨极氩弧焊焊接后形成焊接接头,根据微观组织特点将焊接接头分成不同的区域,包括焊缝中心区(weld zone, WZ)、熔合区(fusion zone, FZ)、热影响区(heat-affected zone, HAZ)、母材区(base material, BM)。锆元素常温下为 α 相密排六方结构,当温度升至850℃后,开始发生同素异构转变,由 α 相转变为体心立方结构的 β 相,其转变温度主要取决于锆合金中的化学成分。

从图3c中可以看到,母材为密排六方结构(hexagonal close-packed structure, HCP)的 α 等轴晶,上半部

分晶粒尺寸明显大于下半部分晶粒尺寸,且晶粒形貌为等轴晶,因此其为受到焊接热量输入的热影响区。图3b中左侧箭头为板条状 α 相,右侧为不规则的再结晶 α 等轴晶粒,下方箭头所示为针状 α 马氏体。此区域为受到焊接热传递影响发生熔化和未发生熔化的交界处熔合区。通过观察图3a可以发现,其焊缝区组织为平行条状的魏氏组织。

在锆合金 β 向 α 相转变过程中,最常见的组织即为魏氏组织。由于 α 板条的形核方式不同,魏氏组织将表现出两种组织形貌,分别为篮网状和平行板条状。图3a中的组织即为平行板条状魏氏组织。篮网状的魏氏组织是由于 β -Zr为体心立方结构(body-centered cubic, BCC),其表现出良好的对称性,在冷却过程中,可以为 α 板条提供较多的形核位置,当 α 板条在其惯习面上生长时,其他 α 板条间相互交错,故呈现出交错的板条形态;而没有足够的形核位置,并且仅有一个有利于生长的惯习面时, α 板条会沿着 β 相晶界向晶内生长,形成平行板条状的魏氏组织。

图4、6、8为5、10、20 mm的ZrTiNb合金焊接EBSD图,通过AZtecCrystal分析软件统计出不同焊接区域的晶粒分布,如图5、7、9所示。为观察熔合区与热影响区的分界线,选取明显分界处以探究其晶粒大小变化程度,如图4、6、8中b、c图。图5、7、9中4个区域的晶粒尺寸统计分别对应图4、6、8中的图a整体、图b、c中突出显示部分及图d整体。表1为不同厚度

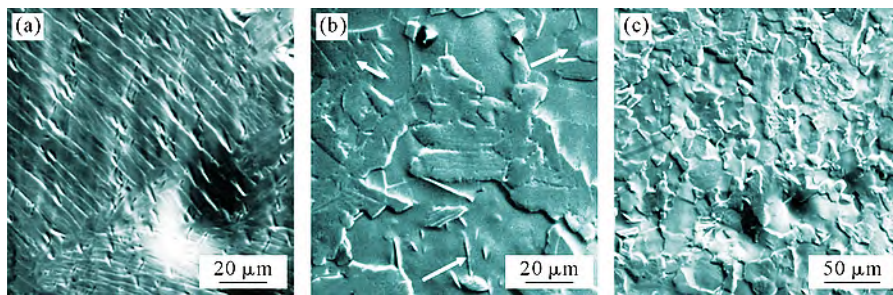


图3 ZrTiNb合金5 mm试样焊接接头各区域微观组织SEM图像:(a)焊缝区;(b)熔合区;(c)热影响区
Fig.3 SEM images of the microstructure in various areas of welded joints in 5 mm sample of the ZrTiNb alloy: (a) weld zone; (b) fusion zone; (c) heat-affected zone

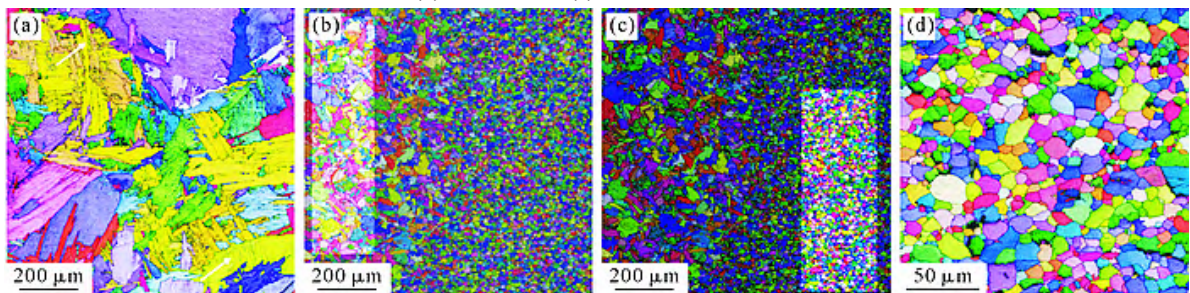


图4 ZrTiNb合金5 mm试样焊接接头各个区域的微观组织EBSD图像:(a)焊缝区;(b)熔合区;(c)热影响区;(d)母材区
Fig.4 EBSD images of the microstructure in various areas of the welded joint in 5 mm sample of the ZrTiNb alloy: (a) weld zone; (b) fusion zone; (c) heat-affected zone; (d) base material area

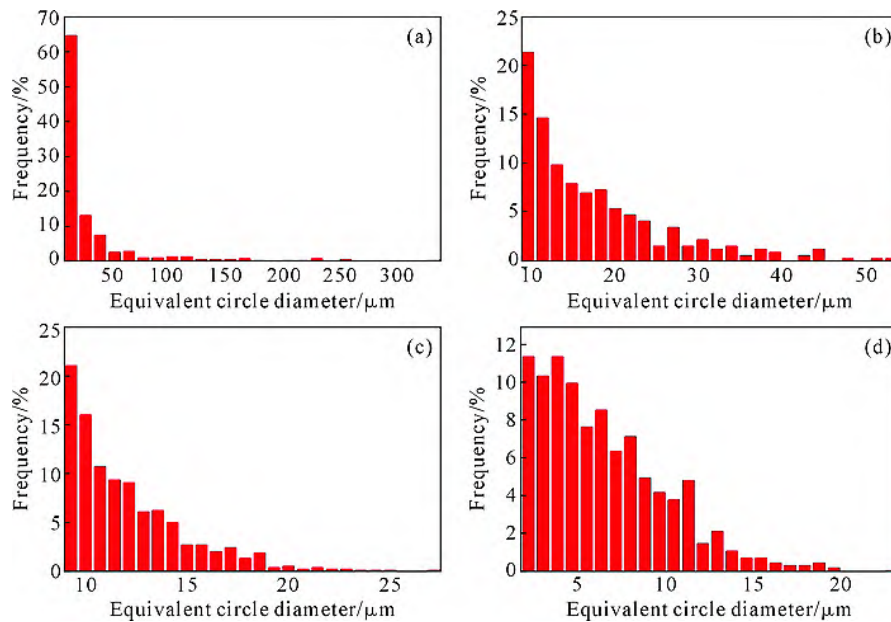


图 5 5 mm 试样不同区域晶粒尺寸统计:(a) 焊缝区;(b) 熔合区;(c) 热影响区;(d) 母材区

Fig.5 Statistics of grain size in different areas of the 5 mm welded sample: (a) weld zone; (b) fusion zone; (c) heat-affected zone; (d) base material area

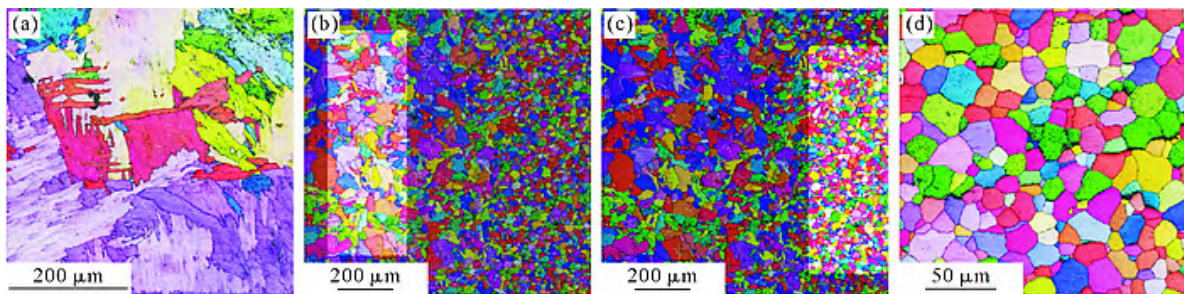


图 6 10 mm 试样焊接接头各区域微观组织 EBSD 图像:(a) 焊缝区;(b) 熔合区;(c) 热影响区;(d) 母材区

Fig.6 EBSD images of microstructure in various areas of the welded joint in 10 mm sample of ZrTiNb alloy: (a) weld zone; (b) fusion zone; (c) heat-affected zone; (d) base material area

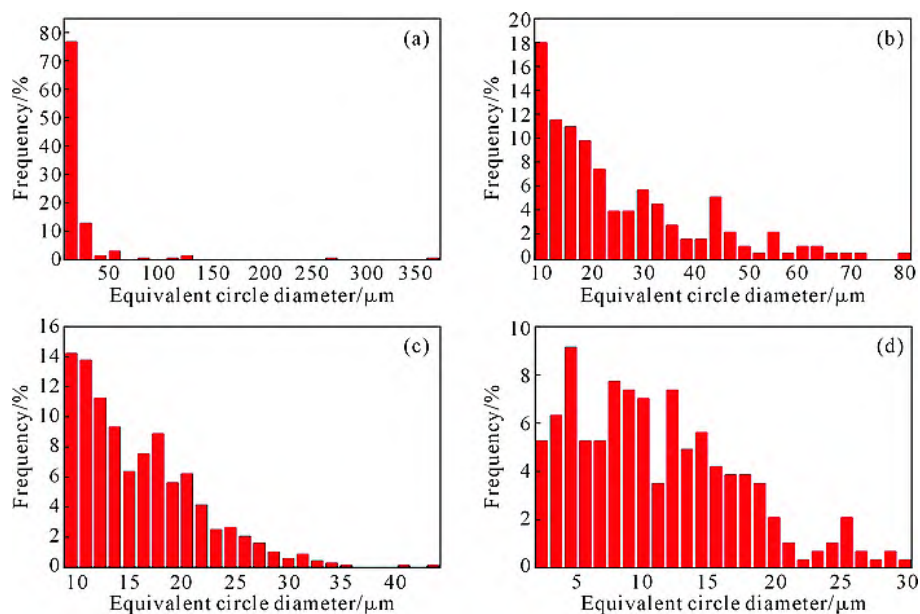


图 7 10 mm 试样不同区域晶粒尺寸统计:(a) 焊缝区;(b) 熔合区;(c) 热影响区;(d) 母材区

Fig.7 Statistics of grain size in different areas of 10 mm welded samples: (a) weld zone; (b) fusion zone; (c) heat-affected zone; (d) base material area

表1 不同厚度各区域晶粒等效圆直径
Tab.1 Equivalent circular diameter of grains in different regions of samples with different thicknesses

Thickness/mm	WZ/ μm	FZ/ μm	HAZ/ μm	BM/ μm
5	31.9	17.7	12.0	10.6
10	20.7	23.5	15.4	11.1
20	24.0	19.5	15.8	11.4

板材焊接接头各个区域晶粒等效圆直径。

由图4、6、8可知,不同厚度的样品在EBSD中所反映的微观组织特征差别较小,因此以图4为例分析其微观组织结构。从图4a中可以看出在焊缝区域,除了由下方箭头所示的粗大的片层状魏氏体集束外,也存在如上方箭头所示的少量篮网状魏氏组织。Holt^[18]通过控制Zr-4的冷速,观察 β 相向 α 相转变的现象发现,由魏氏组织的存在可以判断出该区域出现了 β - α 转变。其中,转变后的组织形态与冷却速度有关。陈宝凤^[19]总结出随着冷却速率的降低,微观结构转变为 α' 马氏体($\geq 1\,300\text{ }^{\circ}\text{C/s}$)、篮网状魏氏组织($10\sim 1\,300\text{ }^{\circ}\text{C/s}$)、平行板条状魏氏组织($0.5\sim 10.0\text{ }^{\circ}\text{C/s}$)、以及Lenticular结构^[20-21]($\leq 0.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$),因此可大致判断

焊样冷速为 $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 左右。从图4b可知,相较于图4a其魏氏体晶粒已显著变小,在右侧有一明显分界,这是因为随着与焊缝距离增加,其收到的热输入量减小,高温停留时间短、散热快等,出现了熔合区与热影响区的交界。分界线右侧由不规则锯齿状晶界的等轴 α 相晶粒构成,即图4c所示区域。通过与图4d对比可以看出组织发生了一定程度的晶粒粗化,组织大小不均匀主要是由于导热系数小、受热不均匀导致。图4d为热输入量为0的母材区,仍保持着铸态 α 等轴晶粒组织。

从表1可以看出,其晶粒尺寸由焊缝区向熔合区、热影响区直至母材区过渡,呈现递减趋势。这是因为随着距离焊缝区距离的增加,其所受焊接热量影响越小,提供给晶粒长大所需要的能量减小,导致晶粒尺寸递减。

经过EBSD分析得到了不同厚度ZrTiNb合金TIG焊接接头各个部分的微观组织形貌和晶粒尺寸,随后进行了KAM图像处理,进一步探究其晶粒内部的位错分布及亚结构。

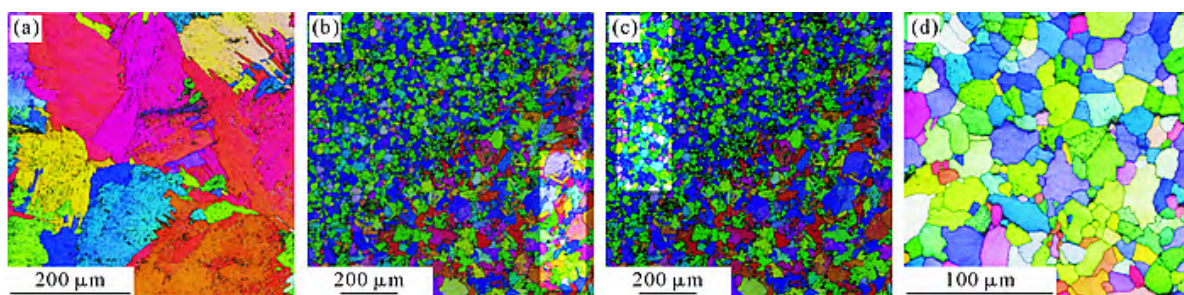


图8 ZrTiNb合金20 mm试样焊接接头各区域微观组织EBSD图像:(a)焊缝区;(b)熔合区;(c)热影响区;(d)母材区
Fig.8 EBSD images of microstructure in various areas of the welded joint in 20 mm sample of ZrTiNb alloy: (a) weld zone; (b) fusion zone; (c) heat-affected zone; (d) base material area

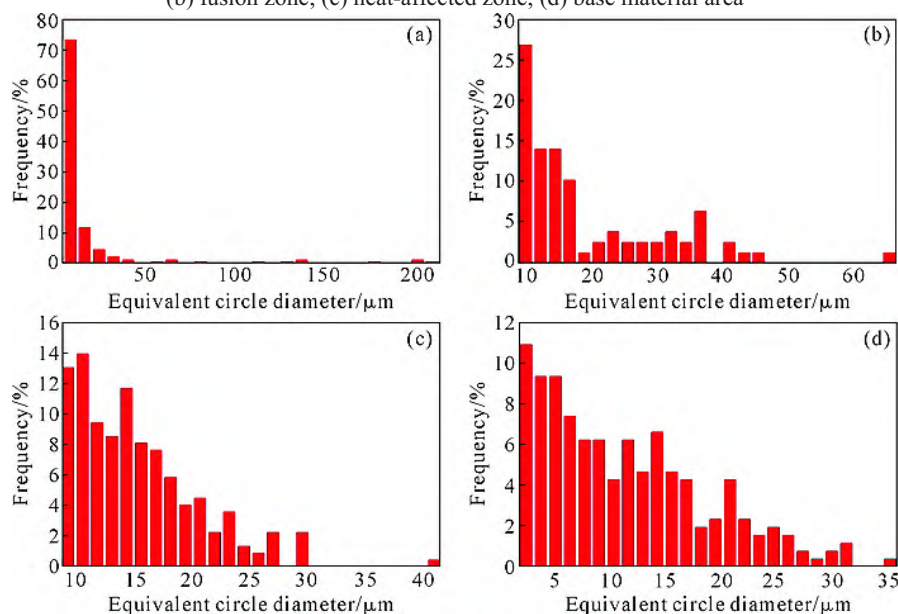


图9 20 mm试样不同区域晶粒尺寸统计:(a)焊缝区;(b)熔合区;(c)热影响区;(d)母材区
Fig.9 Statistics of grain size in different areas of 20 mm welded sample: (a) weld zone; (b) fusion zone; (c) heat-affected zone; (d) base material area

图10为不同厚度样品的KAM分布。由图10a可以明显观察到,在焊缝区单个晶粒中的应力呈条状及十字形篮网状分布,对应焊缝区的板条状和篮网状魏氏组织。由图10b观察到熔合区与热影响区之间存在过渡区,其中分界线深色一侧为发生了相变的熔合区,其位错密度大,原因为 α 相板条的形成是马氏体相变的结果。马氏体相变是典型的切变型无扩散相变,点阵重构由原子集体的、有规律的、近程的迁移完成,通常以滑移和孪生方式进行,此时会产生大量的位错和孪晶。大量位错分布不均,在高温下会相互缠结形成胞状亚结构,成为位错胞,即其中含有的位错多,强度更高。其另一侧的浅色区域为没有发生相变,但受热量传递影响晶粒发生了明显长大的热影响区。图10c为母材区,其组织为 α 等轴晶粒,位错主要分布在晶界处,但也可以观察到在某些晶粒内部有高密度的位错分布,亚结构晶粒的形成可能与锻造过程中产生的残余应力有关。对比分析不同厚度的KAM图像,可以观察到母材区20 mm厚度的亚结构晶粒数量相较于5、10 mm有显著提升,焊缝区、熔合区、热影响区20 mm厚度的位错密度显著低于5 mm区域,与10 mm区域相似。

2.2 ZrTiNb合金焊后力学性能分析

为进一步分析其力学性能,将不同厚度的焊样进行了力学性能测试,表2为力学性能参数,图11为不同厚度的焊样拉伸曲线。

表2 5、10、20 mm焊样力学性能

Tab.2 Mechanical properties of the 5, 10 and 20 mm welded samples

Sample number	Plastic extension strength, $R_{p0.2}$ /MPa	Tensile strength, R_m /MPa	Elongation after fracture, A /%	Reduction of area, Z /%
5 mm-1	312	397	19.0	43
5 mm-2	312	395	20.5	53
5 mm-3	311	394	22.0	51
10 mm-1	328	394	27.5	55
10 mm-2	328	396	25.5	61
10 mm-3	326	394	25.0	60
20 mm-1	296	367	27.0	59
20 mm-2	292	367	24.5	58
20 mm-3	296	368	24.0	58

根据表2可以明显看出,随着试样厚度增加其塑性延伸强度、抗拉强度呈现先增加后下降的趋势,在20 mm的厚度下出现明显下降。断后伸长率与断面收缩率在10、20 mm相对于5 mm试样呈现增加的

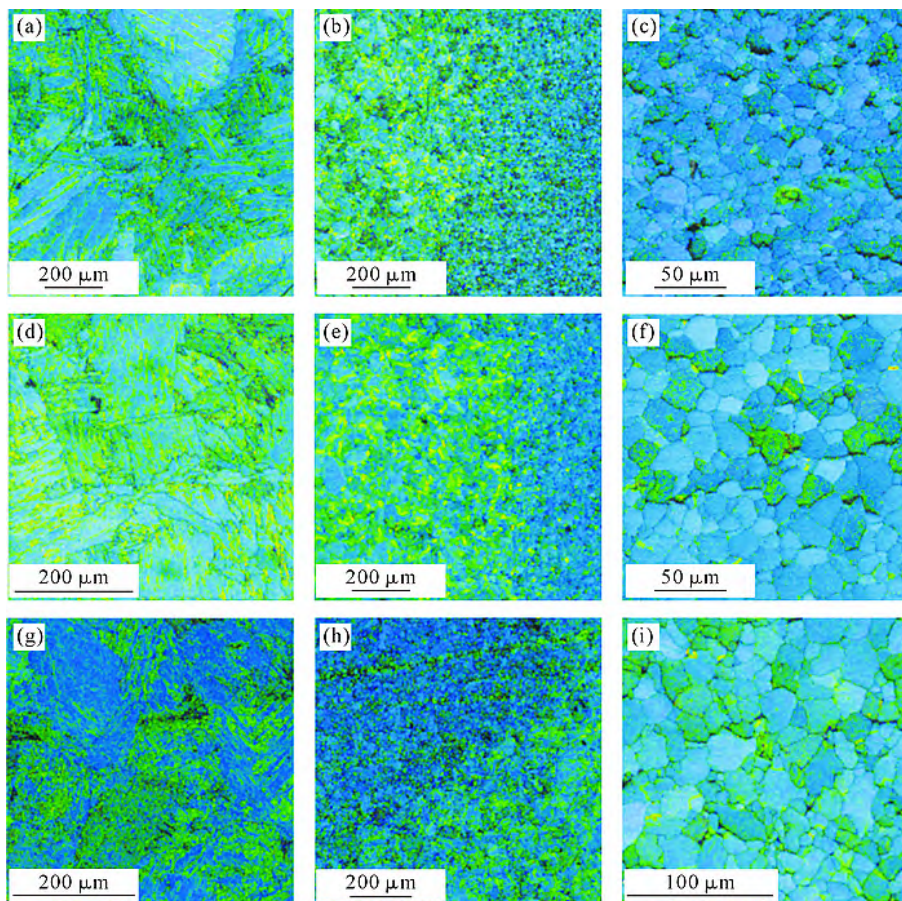


图10 5、10、20 mm焊样不同区域KAM图:(a~c) 5 mm试样;(d~f) 10 mm试样;(g~i) 20 mm试样
Fig.10 KAM images of different areas in 5, 10 and 20 mm welded samples: (a~c) 5 mm samples; (d~f) 10 mm samples; (g~i) 20 mm samples

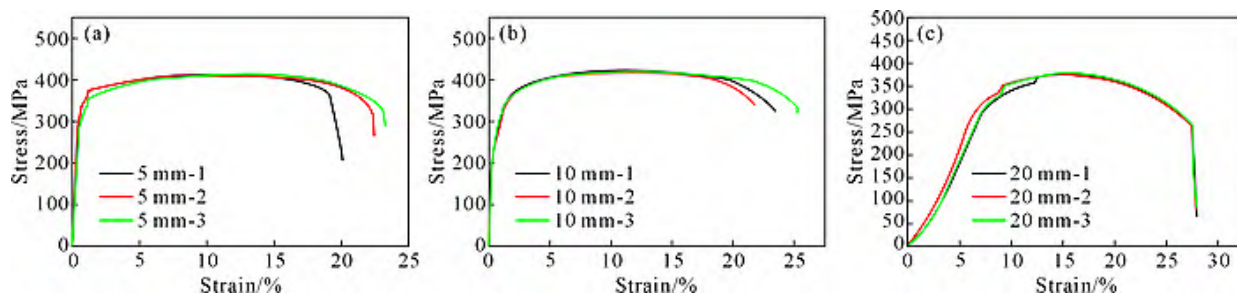


图 11 焊样拉伸曲线:(a) 5 mm; (b) 10 mm; (c) 20 mm

Fig.11 Tensile curves of welded samples: (a) 5 mm; (b) 10 mm; (c) 20 mm

趋势,但10 mm试样和20 mm试样性能相近。根据上文KAM图像分析可知,对于多晶材料而言,位错密度增加会产生更多的位错缠结和位错胞的出现,因此需要增加外力才能使晶界滑移宏观表现为材料屈服强度增加。由于20 mm试样的位错密度显著低于5 mm试样,与10 mm试样类似,因此其塑性延伸强度和抗拉强度低,且根据表1可知其晶粒尺寸较10 mm时大,因此其力学性能不佳。

3 结论

(1)经过钨极氩弧焊焊接的ZrTiNb合金焊缝区微观组织为粗大的片层集束和少量的篮网状魏氏组织,组织形态与其冷却速率相关;熔合区微观组织为较小的魏氏体晶粒,与热影响区存在一明显的分界线;热影响区微观组织为不规则锯齿状的等轴 α 相晶粒;母材区为铸态 α 等轴晶粒。

(2)晶粒尺寸随着焊缝区向熔合区、热影响区直至母材区过渡呈现递减趋势。

(3)随着试样厚度增加ZrTiNb塑性延伸强度、抗拉强度呈现先增加后下降的趋势,在20 mm的厚度下出现明显下降,断后伸长率与断面收缩率在10、20 mm时相对于5 mm试样呈现增加趋势,但10 mm试样和20 mm试样性能相近。

参考文献:

- [1] BELL B D C, MURPHY S T, BURR P A, COMSTOCK R J, PARTEZANA J M, GRIMES R W, WENMAN M R. The influence of alloying elements on the corrosion of Zr alloys[J]. Corrosion Science, 2016, 105: 36-43.
- [2] XU J P, LI H, ZHAO X, WU J Y, ZHAO B, ZHAO H Z, WU J P, ZHANG Y S, LIU C Z. Zirconium based neutron absorption material with outstanding corrosion resistance and mechanical properties[J]. Journal of Nuclear Materials, 2022, 567: 153763.
- [3] KING D J M, KNOWLES A J, BOWDEN D, WENMAN M R, CAPP S, GORLEY M, SHIMWELL J, PACKER L, GILBERT M R, HARTE A. High temperature zirconium alloys for fusion energy[J]. Journal of Nuclear Materials, 2022, 559: 153431.
- [4] 熊炳昆. 锆的核性能及其在核电工业中的应用[J]. 稀有金属快报, 2005, 24(3): 43-44.

- XIONG B K. The nuclear properties of zirconium and its application in the nuclear power industry[J]. Rare Metals Letters, 2005, 24 (3): 43-44.
- [5] QI B Y, LIU C Z, YANG Q H, XU J P, LIU L, QIU L S, ZHANG Y S. Stress corrosion cracking behavior of commercial Zr702 in boiling nitric acid solutions for spent nuclear fuel reprocessing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(12): 4483-4487.
- [6] 冯志浩,夏超群,张新宇,马明臻,刘日平. 高强韧锆合金的发展与应用[J]. 材料科学与工艺, 2018, 26(2): 1-8.
- FENG Z H, XIA C Q, ZHANG X Y, MA M Z, LIU R P. Development and applications of zirconium alloys with high strength and toughness[J]. Materials Science and Technology, 2018, 26(2): 1-8.
- [7] 王鹏,张卫刚,孙旭东. 锆在硫酸提浓工艺中的腐蚀研究[J]. 材料导报, 2020, 34(Z1): 385-389.
- WANG P, ZHANG W G, SUN X D. Study on corrosion of zirconium in sulfuric acid concentration process[J]. Materials Reports, 2020, 34(Z1): 385-389.
- [8] SLOBODYAN M S. Arc welding of zirconium and its alloys: A review[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, 133: 103630.
- [9] SIDELEV D V, KASHKAROV E B, GRUDININ V A, KRINITCYN M G. High-temperature oxidation of Cr-coated laser beam welds made from E110 zirconium alloy[J]. Corrosion Science, 2022, 195: 110018.
- [10] SHEN H H, ZU X T, CHEN B, HUANG C Q, SUN K. Direct observation of hydrogenation and dehydrogenation of a zirconium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 659: 23-30.
- [11] KAUFHOLZ P, STUKE M, BOLDT F, PÉRIDIS M. Influence of kinetic effects on terminal solid solubility of hydrogen in zirconium alloys[J]. Journal of Nuclear Materials, 2018, 510: 277-281.
- [12] 刘承新. 锆合金在核工业中的应用现状及发展前景[J]. 稀有金属快报, 2004, 23(5): 21-23.
- LIU C X. Application status and development prospects for Zr alloys in nuclear industry[J]. Rare Metals Letters, 2004, 23(5): 21-23.
- [13] 吴宏伟,杭逸夫,徐宇皓,方雨. 锆 R60702 TIG 焊焊接工艺及接头性能研究[J]. 热加工工艺, 2008, 37(5): 83-84.
- WU H W, HANG Y F, XU Y H, FANG Y. Study on TIG welding procedure of Zr R60702 and properties of welded joints[J]. Hot Working Technology, 2008, 37(5): 83-84.
- [14] 凌堃,王正东. TIG 焊对工业纯锆 R60702 接头腐蚀性能的影响[J]. 核动力工程, 2013, 34(3): 37-41.
- LING K, WANG Z D. Effect of TIG welding on corrosion resistance of zirconium R60702[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, 34(3): 37-41.

- [15] 刘志颖, 郭小辉, 晏阳阳, 王乃友. 锆 R60702GTAW 焊接接头组织和性能研究[J]. 材料开发与应用, 2014, 29(4): 25-28.
LIU Z Y, GUO X H, YAN Y Y, WANG N Y. Study on structure and properties of zirconium R60702 on GTAW welding joint[J]. Development and Application of Materials, 2014, 29(4): 25-28.
- [16] 李宁, 张敏, 牛靖, 叶建林. Zr-702 锆板 TIG 焊接接头硫酸环境耐蚀性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(12): 4618-4623.
LI N, ZHANG M, NIU J, YE J L. Study on corrosion resistance of Zr-702 zirconium plate TIG welded joint in sulfuric acid environment[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(12): 4618-4623.
- [17] KIM J Y, HWANG H W, LEE D H, LEE J W, LEE D G. Similar and dissimilar welding properties of zirconium by TIG welding[J]. Journal of the Korean Society for Heat Treatment, 2021, 34(4): 165-170.
- [18] HOLT R A. The beta to alpha phase transformation in Zircaloy-4 [J]. Journal of Nuclear Materials, 1970, 35(3): 322-334.
- [19] 陈宝凤. 强流脉冲电子束和脉冲激光对 Zr702 表面组织及结构的影响研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2016.
CHEN B F. Research on surface microstructure and texture of Zr702 by high current pulsed electron beam and pulsed laser[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2016.
- [20] LUAN B F, CHAI L J, WU G L, YU H B, CHEN J W, LIU Q. Twinning during $\beta \rightarrow \alpha$ slow cooling in a zirconium alloy[J]. Scripta Materialia, 2012, 67(7-8): 716-719.
- [21] JEONG Y H, RHEEM K S, CHOI C S, KIM Y S. Effect of beta heat treatment on microstructure and nodular corrosion of Zircaloy-4 [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1993, 30(2): 154-163.