DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5264

板式换热器用 TIG 焊接 Zr–3 板材的组织演变、力学性能及醋酸中的腐蚀性能

王子贺[1],程　军[2],赵院婷[3],刘中亚[3],王泽鑫[1],贺一轩[2],陈靓瑜[1],芦　笙[1]

(1. 江苏科技大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212100;2. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室, 陕西 西安 710072;3. 江苏索普赛瑞装备制造有限公司,江苏 镇江 212002)

摘　要:为了推动国产 Zr-3 板材在醋酸板式换热器中的工程应用,针对极气体氩弧焊(tungsten inert gas welding, TIG)焊接接头的组织、力学性能及腐蚀性能关联性开展了系统研究。通过光学显微镜(OM)和电子背散射衍射分析(EBSD)观察到,母材(base metal, BM)主要为 α-Zr 等轴晶,平均晶粒尺寸为 3.5 μm;焊缝(weld zone, WZ)则为 α-Zr 板条状魏氏体组织,晶粒尺寸为 5.1 μm,焊缝晶粒取向差(kernel average misorientation, KAM)为 0.37°低于母材的 0.51°。室温拉伸及显微硬度测试结果表明,Zr-3 锆合金 TIG 焊接接头的抗拉强度较母材降低 2.2%,伸长率出现显著下降,降幅约 53.8%,而接头的显微硬度略高于母材。电化学测试中发现,在不同浓度醋酸中,焊缝的腐蚀电流密度略高于母材,表明焊缝的腐蚀倾向稍高,但所有试样的腐蚀速率均满足工业要求。研究证明,TIG 焊接的 Zr-3 板材在醋酸工况下具有优良的综合性能。

关键词: Zr-3 板材;TIG 焊接;组织演变;力学性能;醋酸腐蚀;魏氏组织;电化学行为

中图分类号: TG17　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1000-8365(2026)09-1027-11

Microstructure Evolution, Mechanical Properties, and Corrosion Performance in Acetic Acid of TIG–welded Zr–3 Plates for Plate Heat Exchangers

WANG Zihe[1], CHENG Jun[2], ZHAO Yuanting[3], LIU Zhongya[3], WANG Zexin[1], HE Yixuan[2], CHEN Liangyu[1], LU Sheng[1]

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China; 2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. Jiangsu Supursery Equipment Manufacturing Co., Ltd., Zhenjiang 212002, China)

Abstract: To promote the engineering application of domestic Zr-3 plates in acetic acid-based plate heat exchangers, a systematic study was conducted to investigate the correlation between the microstructural evolution law, mechanical properties, and acetic acid corrosion behavior of tungsten inert gas (TIG) welded joints. Microstructure characterization of the welded joints was performed using optical microscopy (OM) and electron backscatter diffraction (EBSD) techniques, and the results reveal that the base metal (BM) is composed primarily of uniformly fine equiaxed α-Zr grains with an average grain size of 3.5 μm. In contrast, the weld zone (WZ) has a lath-like Widmanstätten structure of α-Zr, with a grain size of 5.1 μm. Moreover, the kernel average misorientation (KAM) value of the weld joint is 0.37°, which is lower than that of the base metal (0.51°). Room-temperature tensile and microhardness tests demonstrate that the tensile strength of Zr-3 zirconium alloy TIG-welded joints decreases by 2.2% relative to that of the base metal, whereas the elongation

收稿日期:2025-12-01

基金项目:凝固技术全国重点实验室开放课题(SKLSP202415);新材料重大专项(2025ZD0619500, 2025ZD0619502);西安英才计划菁英创新人才(XAYC240016)

作者简介:王子贺,2000 年生,硕士生. 研究方向为金属材料腐蚀. Email: zihewang2025@126.com

通信作者:程　军,1985 年生,博士生,正高级工程师. 研究方向为稀有金属材料制备与加工、机器学习辅助合金设计、医用金属材料. Email: chengjun_851118@126.com

引用格式:王子贺,程军,赵院婷,刘中亚,王泽鑫,贺一轩,陈靓瑜,芦笙. 板式换热器用 TIG 焊接 Zr-3 板材的组织演变、力学性能及醋酸中的腐蚀性能[J]. 铸造技术,2026, 47(9): 1027-1037.

WANG Z H, CHENG J, ZHAO Y T, LIU Z Y, WANG Z X, HE Y X, CHEN L Y, LU S. Microstructure evolution, mechanical properties, and corrosion performance in acetic acid of TIG-welded Zr-3 plates for plate heat exchangers[J]. Foundry Technology, 2026, 47(9): 1027-1037.

significantly decreases by approximately 53.8%. Moreover, the microhardness of the welded joints is slightly greater than that of the base metal. The corrosion behavior of the welded joints in acetic acid solutions was studied via potentiodynamic polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy. The results demonstrate that across different acetic acid concentrations, the corrosion current density of the WZ is slightly higher than that of the BM, indicating a marginally greater corrosion tendency of the WZ; nevertheless, all the samples meet the industrial corrosion requirements for plate heat exchangers under acetic acid service conditions. This study confirms that TIG-welded Zr-3 plate joints exhibit excellent comprehensive mechanical properties and acetic acid corrosion resistance.

Key words: Zr-3 plate; tungsten inert gas welding; microstructure evolution; mechanical properties; acetic acid corrosion; Widmanstätten structure; electrochemical behavior

锆及锆合金因优异的耐腐蚀性、良好的力学性能和热稳定性，在醋酸等强腐蚀性化工介质的装备制造中具有不可替代的地位，其中 Zr-3 合金凭借对醋酸介质的“免疫级”耐蚀性，成为醋酸板式换热器的核心材料之一。醋酸生产过程尤其是甲醇羰基化工艺需在 180~200 ℃、3.0~3.5 MPa 的高温高压工况下进行，换热器作为控温与能量回收的核心设备，直接决定生产连续性与安全性 。若换热器密封失效，会引发醋酸外漏导致设备腐蚀、环境污染，或冷热流道串液污染产物，因此核心部件需通过焊接实现可靠连接。钨极惰性气体保护(tungsten inert gas, TIG)焊因电弧稳定、焊缝成形质量高，成为 Zr-3 板材焊接的主流工艺。但焊接过程中的快速加热冷却热循环会导致接头组织异质化，进而影响力学性能与耐蚀性[1]。

普通金属材料难以适配醋酸强腐蚀环境：260 ℃、50%浓度的醋酸工况下，不锈钢腐蚀率达 22 mm/y，镍基合金为 1.7 mm/y，而锆材腐蚀率<0.025 mm/y，展现出优异耐蚀性[2]。Zr-3 作为国产锆材，其化学成分与进口 R60702 基本一致，且抗拉强度(480 MPa)、屈服强度(390 MPa)优于进口材料，成为醋酸板式换热器的优选基材[3]。板式换热器相比传统管壳式换热器，传热效率提升 30%~50%、占地面积减少40%，且易清洁，进一步适配醋酸生产对设备性能的需求[4]。

从国内外研究进展来看，针对锆合金的焊接研究多集中于核工业领域(如锆合金包壳焊接)，对化工领域 Zr-3 合金焊接接头的组织–性能–腐蚀关联性研究仍显不足。国内外学者围绕锆合金焊接与腐蚀性能开展了大量研究。左小涛等[5]研究发现，R60702 TIG 焊接接头在低浓度醋酸中，热影响区耐蚀性最差、焊缝次之、母材最优，热影响区易优先发生点蚀。Kumar 等[6]研究了 Zr-4 合金焊接的柱状晶生长机制，国内团队则聚焦于锆合金轧制工艺对晶粒细化的影响，但针对 TIG 焊接 Zr-3 合金在醋酸工况下的组织演变、力学性能与腐蚀协同作用的系统研究尚未见报道。

当前存在的关键问题在于焊接热循环会诱发 Zr-3 合金焊缝区产生魏氏组织、织构差异等微观缺陷，这些缺陷如何同时影响其力学性能与醋酸耐蚀性，缺乏量化关联数据；且现有研究未明确 Zr-3 焊接接头在醋酸介质中的长期服役可靠性。

本研究关联 TIG 焊接 Zr-3 合金的微观组织、力学性能、醋酸腐蚀行为，通过电子背散射衍射分析技术(electron backscatter diffraction, EBSD)、电化学测试等多手段量化分析，系统研究 TIG 焊接 Zr-3 板材的组织演变规律，及其与力学性能、醋酸腐蚀性能的关联机制，旨在填补化工用 Zr-3 合金焊接性能研究的空白，为醋酸板式换热器的国产化制造提供理论与实验支撑，对推动国产锆材在醋酸换热设备中的工程应用具有重要现实意义。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验所用 Zr-3 板材厚度为 24 mm，其化学成分(质量分数，下同)为：Hf≤0.8%、Fe+Cr=0.046%~0.047%、O=0.13%~0.14%、N≤0.01%、C≤0.005%、H≤0.001%，Zr+Hf≥99.2%，符合 GB/T 8768-2014 标准要求。焊接方法为 TIG 焊接，采用多层多道焊接方式，焊接填充材料选用 ERZr-2 焊丝，焊接保护气体为 99.999%高纯氩气，具体焊接参数和焊接接头宏观图见表 1 和图 1。醋酸腐蚀试验所用试剂为分析纯冰醋酸(CH_3COOH，纯度≥99.5%)与去离子水，配制 10%、30%两种浓度的醋酸溶液，模拟不同生产阶段的醋酸环境。

表 1 Zr–3 TIG 焊焊接参数
Tab.1 Welding parameters of Zr–3 TIG welding

Weld pass	Wire diameter/mm	Welding current/A	Arc voltage /V	Welding speed /(cm·min^{-1})	Heat input /(kJ·cm^{-1})
1~2	ϕ2.4	150	15	18	12.8
3~13	ϕ3.2	190	17	20	13.8

1.2 微观组织表征

从焊接接头中截取 10 mm×10 mm×3 mm 的试

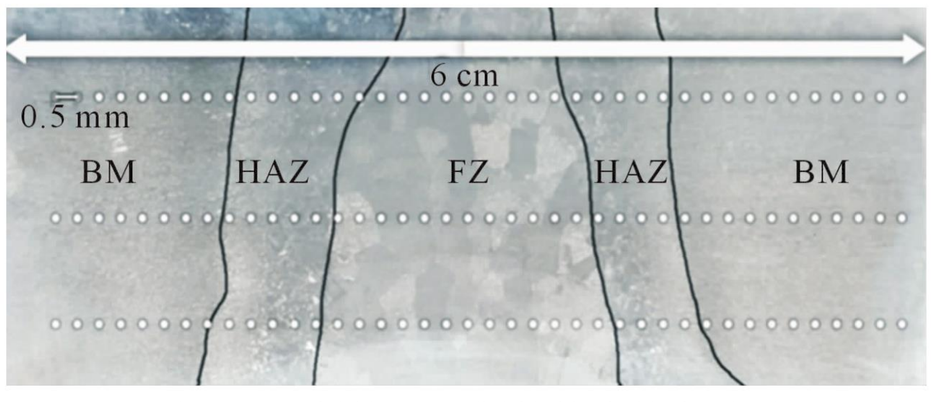


图 1　TIG 焊接 Zr-3 焊接接头的宏观图

Fig.1　Macrograph of TIG-welded Zr-3 alloy welded joint

样，经 400#~2000# 砂纸逐级打磨后，采用 2.5 μm 金刚石抛光剂抛光，最后浓度配比为 5%氢氟酸 +45%硝酸 +50%水的腐蚀液腐蚀 10~15 s，制备金相试样。

采用 Olympus GX71 型光学电子显微镜技术(optical microscopy, OM)观察母材与焊缝的宏观组织；采用 TESCAN MAIA3 型 EBSD 分析晶粒取向与织构，扫描步长 0.5 μm，数据通过 Aztec ctrystal 软件处理，以晶粒取向差(kernel average misorientation, KAM)值表征局部应力水平。

1.3　力学性能测试

对经过精细打磨抛光的样品进行维氏硬度测试。使用数字维氏硬度计(KB 30S)对样品表面沿图 1 所示的 3 条测试线在试样表面进行硬度打点，每个压痕点施加 100 g 的载荷并保持 15 s。通过光学显微镜测量由标准金刚石压头产生的方形压痕，计算出每个压痕的维氏硬度值，最终取测试结果的平均值作为样品的最终硬度值。

按照 GB/T 228.1-2021 标准，用电火花从焊接接头和母材中切割焊缝制备狗骨头的焊缝和母材拉伸试样(标距段长 18 mm、宽 5 mm、厚 1.6 mm)，将试样表面用砂纸打磨光滑去除氧化膜后，采用 Instron 5969 型万能材料试验机进行室温拉伸试验，加载速率 1 mm/min，每组测试 3 个平行试样，取平均值。采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope，SEM)观察拉伸断口形貌，分析断裂位置与断裂机制。

1.4　醋酸腐蚀性能测试

样品的电化学行为使用配备三电极系统的 CHI660E 电化学工作站(Chenhua Ltd.)进行检测，工作电极为焊接接头试样(暴露面积 1 cm^2，非工作面用环氧树脂密封)，辅助电极为铂片，参比电极为饱和甘汞电极(saturated calomel electrode，SCE)，电解质为 10%、30%醋酸溶液，测试温度 38 ℃。

通过测试样品的开路电位(open circuit potential，OCP)86400 s，研究样品在溶液中早期成膜的情况。随后，采用恒电位法进行电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy，EIS)测试，施加峰值幅值为 10 mV 的正弦电压信号，测量频率范围为 0.01 Hz 至 10^5 Hz。EIS 数据通过 ZsimpWin3.5 软件进行分析和拟合。电位动态极化测试以 0.001 V/s 的扫描速率，从 -500 mV(vs. OCP)扫描至 1.5 V 进行。电位动态极化测量结果使用 Cview 2.6 软件进行分析。

2　实验结果及讨论

2.1　微观组织与 EBSD

在 TIG 焊接过程中，锆合金的母材(base metal，BM)与焊缝区域(weld zone，WZ)形成显著的组织差异如图 2 所示。这种差异既反映了热循环条件下的微观组织演化规律，也对焊接接头的机械性能与腐蚀性能产生重要影响。母材在低倍显微镜下以紧密排列的 α-Zr 等轴晶为主，晶粒尺寸相对均匀(图 2a)。同时，高倍显微镜下观察发现，在晶界处存在少量第二相粒子，可以观察到少量的第二相粒子分布，这些第二相粒子主要由 Fe、Cr、Ni 等杂质元素组成 [7]，其尺寸较小，一般在 0.5~1 μm 之间(图 2b)。这些杂质元素在 Zr-3 板材中形成的第二相粒子，虽然含量较少，但对板材的性能有着重要的影响[8]，可以作为位错运动的障碍，提高板材的强度和硬度[9]；第二相粒子与基体之间的界面也可能成为裂纹扩展的路径，降低板材的韧性[10]。

焊缝区因焊接热循环影响，呈现出典型的魏氏体组织，由 β-Zr 快速冷却转变为的 α-Zr 板条/针状结构组成，这是由于 TIG 焊接时焊缝区峰值温度超过 Zr 的 β 相变点，β 晶粒长大，冷却过程中 β 相以切变方式转变为 α 相，形成板条状魏氏组织(图 2c 和 d)[11]。魏氏体的针状 α 相具有较高的位错密度，且相界面会阻碍位错运动，因此焊缝的抗拉强度、屈服强度及硬度会显著提高[12-13]。但是魏氏体的针状结构导致焊缝微观组织不均匀，α 相和残留 β 相(或 β 转变产物) 的电极电位差异较大，易形成微电偶腐蚀电池，加速局部腐蚀[14]。Zr-3 合金的固态相变遵循 β→α 转变规律，中等冷却速率即空冷条件下 α 相以魏氏组织形式析出，若 TIG 焊接后快速冷却，则会抑制扩散型相变，触发无扩散马氏体转变(β→α′)。焊缝中 α′马氏体针的生长方向受晶体学取向限制，形成相互交织的针状组织[15]。第二相粒子在焊接过程中部分溶解，导致焊缝中第二相粒子数量减少，这也是焊缝晶粒长大的重要原因之一[16-17]。

为探究母材与焊缝微观组织及晶体学特征的影响，采用 EBSD 技术对试样进行表征，分析晶粒取向、晶内畸变及织构演变规律，表征结果如图 3 所示。母材的反极图配色图 3a 中，晶粒呈等轴状，虽局部存

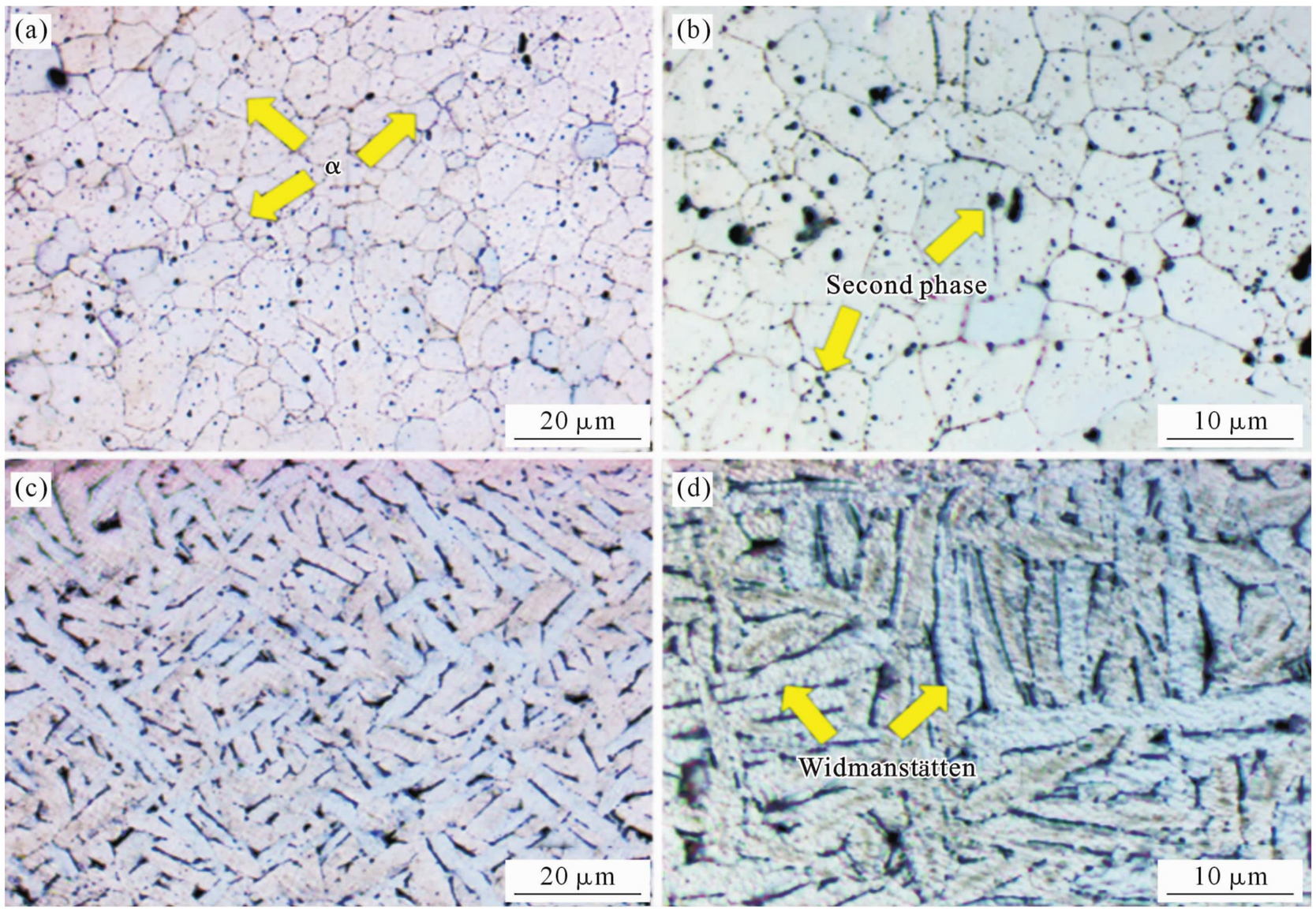


图 2 Zr-3 母材与焊缝的显微结构:(a, b) 母材;(c, d) 焊缝

Fig.2 Microstructure of the Zr-3 base metal and welded joints: (a, b) base metal; (c, d) weld zone

在两个取向相对集中的晶粒簇(非强织构方向),但整体上不同颜色的晶粒无明显择优取向,呈现多晶随机分布特征——这表明母材原始组织为弱织构,晶粒取向分散,是细晶均匀组织的典型表现[18]。焊缝的反极图配色(图 3b)则显示出显著的择优取向特征:大量晶粒呈现长条状板条形态,且反极图颜色集中对应特定晶向。结合 Zr 合金的 β→α 相变特性,这一现象的本质是:焊接热循环中,母材快速加热至 β 相区,β 相沿热流方向择优生长形成柱状晶;随后快速冷却时,β 相遵循 Burgers 相变关系转变为 α 相,α 相继承了 β 相的定向生长取向,最终形成热流主导的板条 α 相择优织构[19]。

从 KAM(kernel average misorientation)值的表征内涵来看,KAM(晶界相邻像素点的取向差)是反映材料内部位错密度与局部晶格畸变程度的关键参数,KAM 值越高意味着位错堆积越密集、局部应力水平越高[20-21]。如图 3c 和 d 所示,母材 KAM 值(0.51°)高于焊缝(0.37°),说明母材内部的位错密度与晶格畸变程度更显著,这与 Zr-3 合金母材的原始制备工艺直接相关:母材经多道次轧制、退火后,虽通过“回复–再结晶”形成了均匀的 α-Zr 等轴晶,但轧制过程中的塑性变形会引入大量位错,后续退火处理仅部分消除位错,未能实现位错的彻底湮灭,因此残留了较高的位错密度与晶格畸变,最终表现为较高的 KAM 值;而焊缝区经历了“重熔–快速冷却”的焊接热循环,母材快速加热至 β 相区后,β 相通过无扩散相变转变为板条 α 相魏氏组织,相变过程以原子协同切变为主,虽会产生微量相变应力,但快速冷却速率抑制了位错的大量萌生与堆积,且焊缝为新鲜相变组织,无加工过程引入的残留位错,因此位错密度与晶格畸变程度显著低于母材,对应 KAM 值更低[22]。

母材较高的 KAM 值(对应高位错密度)可通过“位错钉扎效应”提升材料的强度与硬度,但也会因晶格畸变加剧导致韧性略有降低;而焊缝较低的KAM值虽对应较弱的位错强化效应,但其板条 α 相的大角度晶界强化作用可弥补这一不足——大角度晶界对于位错滑移的阻碍作用显著,使焊缝仍保持较高的强度,同时较低的晶格畸变也减少了应力集中点,有助于缓解裂纹萌生风险[23]。

图 3e 母材的 RD、TD、ND 方向极图中,极点虽局部集中对应两个强织构方向,但整体呈弥散分布,进一步验证其为弱织构组织,有利于力学性能的各向同性;而图 3f 焊缝的极图中极点出现明显的局部高密度区,说明焊缝形成了热流主导的强柱状晶织构:焊接热流沿垂直焊缝方向传递的定向热环境,是 β 晶柱择优生长的核心驱动因素,后续 α 相变继承该取向,最终导致焊缝织构的各向异性[24-26]。

综上,这组 EBSD 结果直观验证了 Zr-3 焊接接头的母材与焊缝的组织差异:母材为局部含弱织构的等轴 α 晶(含少量残余应力),焊缝为强柱状晶织构的板条 α 魏氏组织(低内应力)[27-28]。这种组织差异

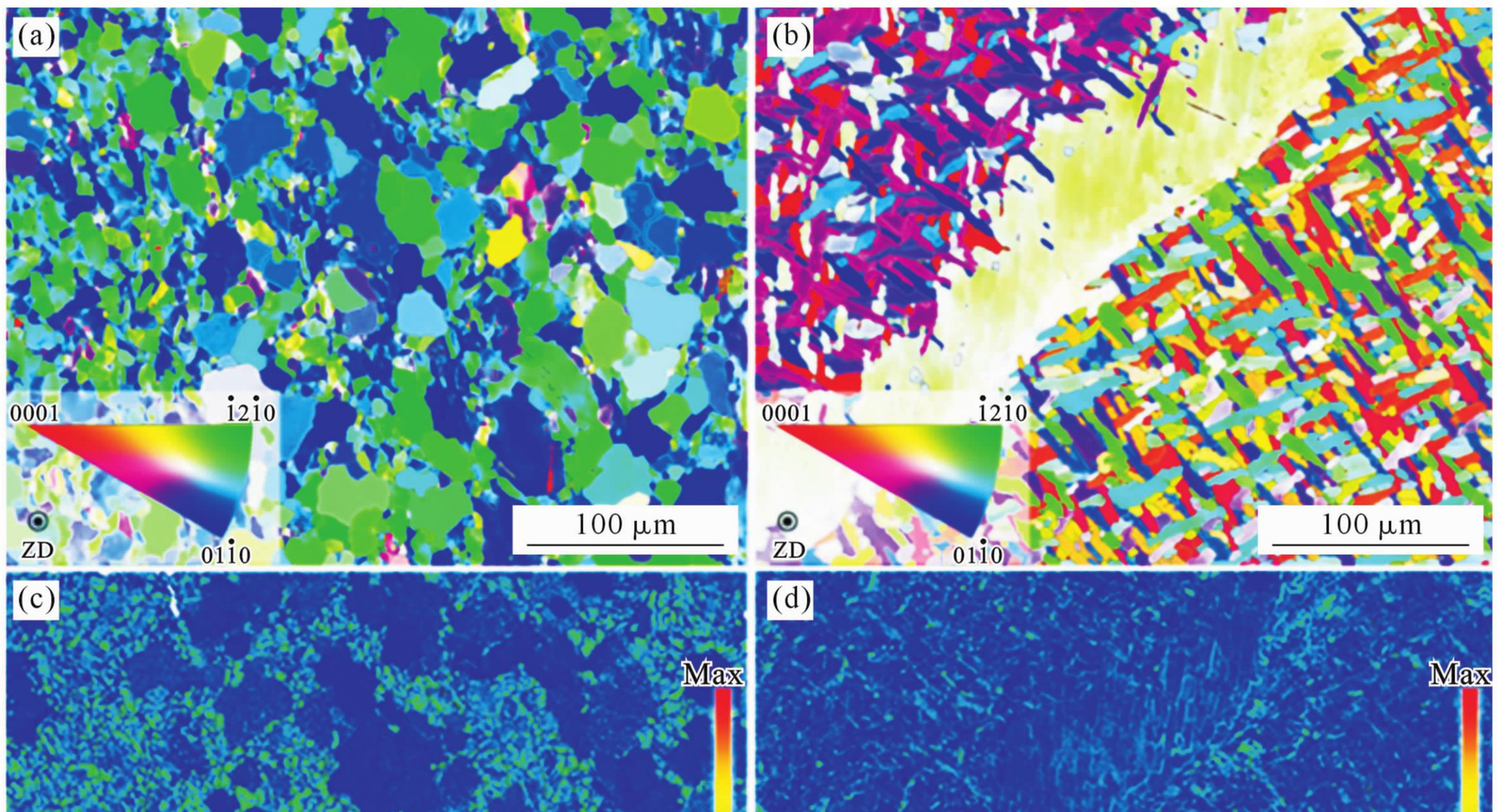


图 3　母材与焊缝的 IPF、KAM 及 PF 图：(a, c, e) 母材；(b, d, f) 焊缝

Fig.3　IPF, KAM and PF maps of the base metal and weld zone: (a, c, e) base metal; (b, d, f) weld zone

是后续“母材塑性优于焊缝、焊缝强度高于母材”“焊缝腐蚀行为存在各向异性”等使役性能规律的微观组织根源，为 Zr-3 焊接接头的性能调控提供了直接的组织依据[29-30]。

母材晶粒尺寸如图 4a 所示，晶粒主要分布在 0.34~20 μm 的区间内，分布相对集中且均匀，晶粒平均尺寸为 3.5 μm，无明显异常大晶粒，体现了母材原始组织的细化特征。由图 2b 可以看到焊缝中心存在大尺寸晶粒，此晶粒为原始 β 晶粒。本文采用等效圆直径法计算晶粒大小，将每个晶粒换算成等面积的圆，以这个圆的直径表征晶粒尺寸[31]。焊缝晶粒如图 4b 所示，平均晶粒尺寸为 5.1 μm。焊缝平均晶

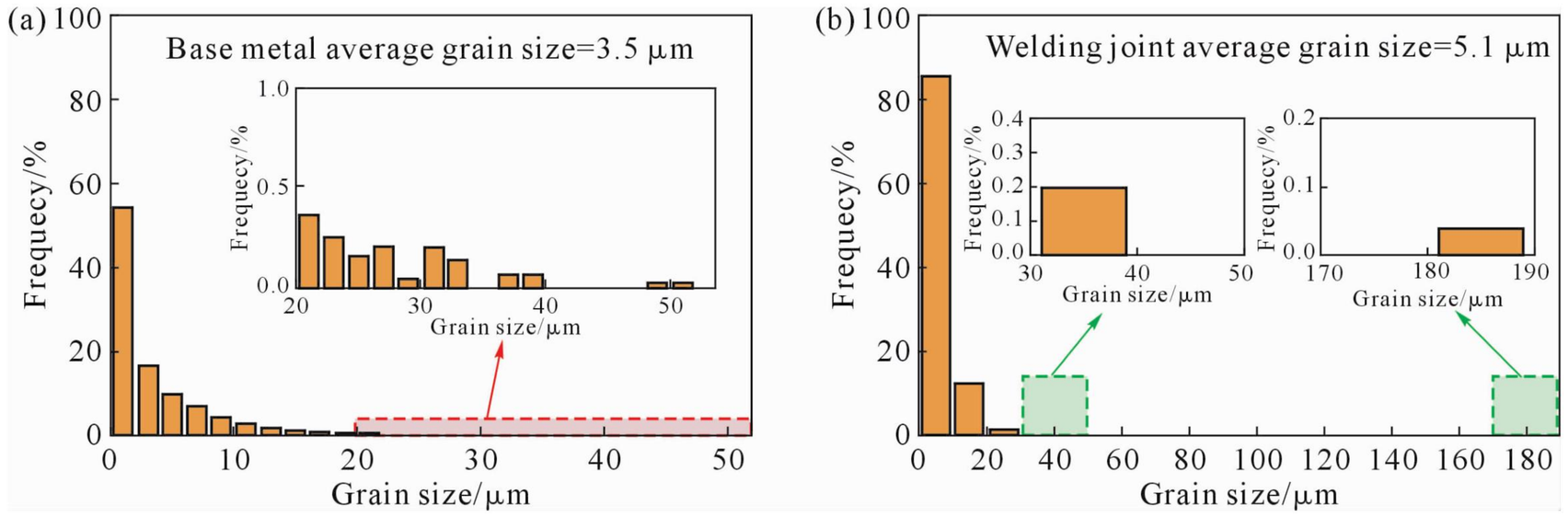


图 4　母材与焊缝的晶粒大小尺寸分布：(a) 母材；(b) 焊缝

Fig.4　Size distribution of grains in the base material and the weld zone: (a) base metal; (b) weld zone

粒尺寸大于母材，主要源于焊接过程的热循环作用:焊接时的高温使母材局部区域发生重熔与再结晶,在冷却过程中,晶粒在高温区易发生长大,尤其是原始β晶界的存在进一步促进了晶粒粗化。尽管焊缝平均晶粒尺寸偏大，但在0.45~20 μm区间的晶粒超过90%,说明其组织并未完全粗化。这也为焊缝力学性能的调控提供了空间：可通过后续的热处理工艺细化晶粒,或通过优化焊接参数抑制焊接过程中的晶粒长大,从而提升焊缝与母材的性能匹配度。

2.2 力学性能

Zr-3 TIG焊接接头与母材的拉伸性能曲线与性能如图5和表2所示,母材与焊接接头的抗拉强度分别是506和495 MPa,实验所得结果与吴宏伟等[32]所做测试结果相近(TIG焊接接头抗拉强度为500 MPa)。结合图5与表2,母材的拉伸曲线呈现典型韧性材料变形行为,包含完整的弹性阶段、屈服平台、均匀塑性变形阶段及颈缩阶段,伸长率高达26%,反映其等轴α相组织兼具优异的强度与塑性储备。相比之下,焊接接头(weld joint, WJ)的曲线弹性阶段斜率与母材接近即弹性模量一样,但屈服后无明显均匀塑性变形阶段,很快进入颈缩断裂,伸长率仅12%,塑性较母材下降超50%,直接体现焊接接头的塑性劣化特征。接头拉伸试样的断裂位置位于热影响区,主要原因是热影响区过热区的粗晶α相强度低、塑性差,是整个接头的力学薄弱点,因此拉伸断裂必然发生在该区域。

表2 Zr–3锆合金母材与TIG焊接接头室温拉伸性能对比
Tab.2 Comparison of room–temperature tensile properties between Zr–3 zirconium alloy base metals and TIG–welded joints

Sample	Tensile strength/MPa	Elongation/%
BM	506.0±9.2	26.0±1.2
WJ	495.0±6.0	12.0±1.8

母材为等轴α相，兼具一定强度和良好塑性,材料发生塑性断裂时,断裂前会通过位错滑移产生大量塑性变形,进而诱发微孔形核、长大与聚合,最终导致断裂,表现为韧性断裂[33]。焊缝的魏氏组织与织构特征表现为,α板条结构虽通过细晶强化提升强度,但板条间的界面结合力较弱,变形过程中易沿板条界面产生裂纹,导致塑性下降。这种强度差异源于焊接过程中的微观组织演变。在TIG焊接热循环作用下,焊缝区域经历了再结晶、晶粒细化及相变等过程。细化的晶粒通过晶界强化提升了焊缝强度，相变产生的强化效应也对焊缝强度有贡献。但母材保留了原始的等轴α相组织,晶粒均匀且第二相粒子的分布更稳定,这些特征共同赋予母材更高的抗拉强度[34]。

为进一步研究焊接接头的断裂机制,对接头与母材的断口进行SEM分析(图6)。从断口形貌来看,母材断口布满均匀的韧窝，属于典型韧性断裂(图6a和b)[35]。解理断裂属于脆性断裂,是晶体在正应力下沿解理面的穿晶断裂,塑性变形小;韧窝断裂属于韧性断裂,由微孔形核、长大和聚合导致,塑性变形大。焊缝断口如图6c和d所示,虽也存在韧窝,但韧窝数量减少且尺寸不均甚至部分区域无明显韧窝,同时出现少量解理面,表现为韧脆混合断裂特征。焊缝的韧脆混合断裂表明其断裂过程中同时发生了脆性的解理断裂和韧性的微孔聚合断裂,而母材的韧性断裂则体现了其断裂时具有较强的塑性变形能力。

图1焊接接头的宏观结果验证了焊接工艺的基本可靠性。接头无宏观缺陷,说明焊接时的氩气保护和热输入控制基本达标。但各区域的清晰划分,也反映出焊接热循环对不同区域的作用程度存在差异。这种差异是后续组织和性能变化的基础。

Zr-3 TIG焊接接头的硬度图如图7所示，焊缝区在焊接过程中经历了完全熔化与重结晶。这个过程让焊缝形成了粗大的晶粒和特殊的相变组织,如Zr合金中的α相和β相,增加了材料局部抵抗变形的能力,故焊缝区硬度达到了202.7 HV。热影响区

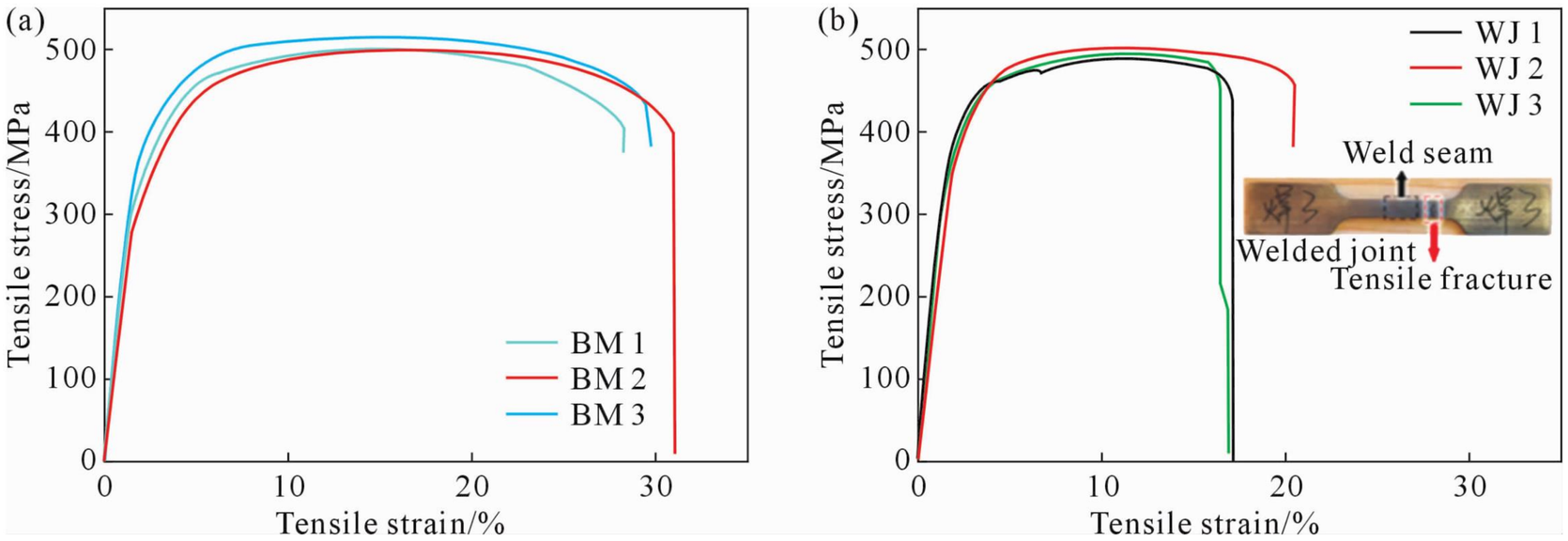


图5 TIG焊接Zr-3母材与接头的拉伸应力–应变曲线:(a) 母材;(b) 焊缝

Fig.5 Tensile stress-strain curves of the Zr-3 base metals and weld joints by TIG: (a) base metal; (b) weld zone

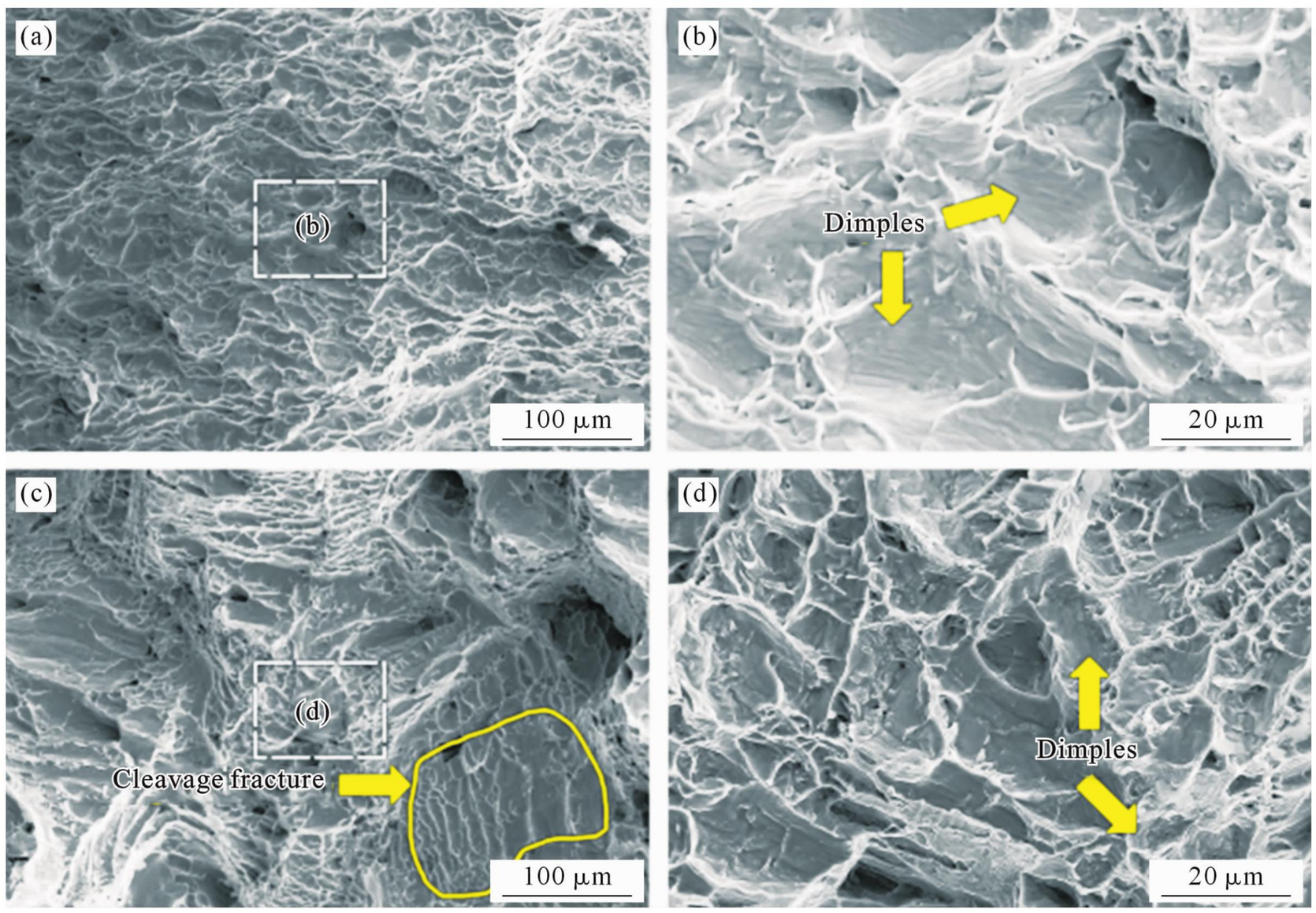


图 6　试样断口形貌 SEM 像：(a, b) 母材；(c, d) 焊缝

Fig.6　SEM images of the fracture morphology of the samples: (a, b) base metal; (c, d) weld zone

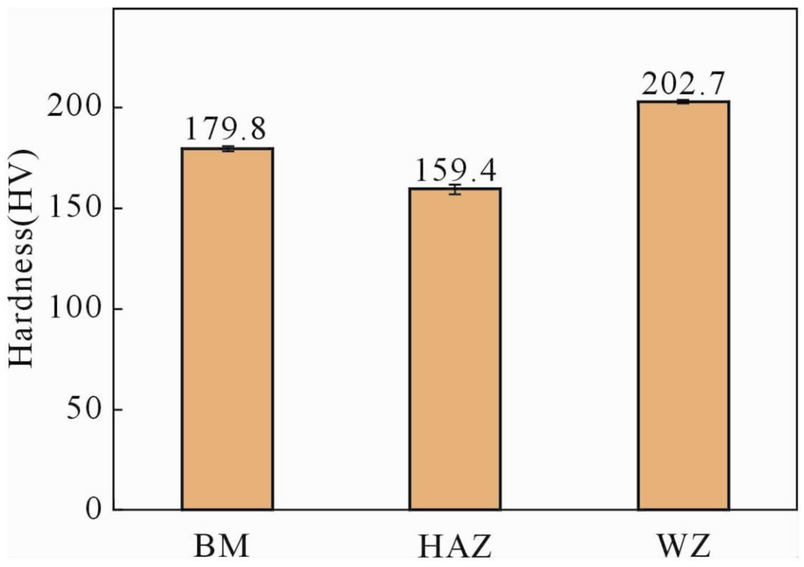


图 7　TIG 焊接 Zr-3 接头区域的硬度分布

Fig.7　Hardness distribution map of the TIG-welded Zr-3 joint zone

没有经历熔化，但承受了焊接高温。高温让热影响区的晶粒发生明显长大，母材原本的细晶强化效应在热影响区大幅减弱，第二相粒子的分布也因高温发生改变。这些变化让热影响区的局部变形抗力下降，故热影响区硬度仅 159.4 HV。母材区保持了原始的细晶组织，第二相粒子的分布也相对稳定。这些特征让母材的硬度维持在 179.8 HV 的中等水平。各区域硬度差异体现了焊接热过程对 Zr-3 合金组织与性能的调控作用[36]。

整体来看，TIG 焊的热输入相对较大。这会让热影响区的范围变宽，晶粒粗化的程度更明显，进一步加剧了热影响区硬度和抗拉强度的双重下降。同时，较大的热输入也让焊缝区的重结晶过程更充分，粗大晶粒和相变组织的占比更高，这让焊缝区出现了硬度升高、强度降低的反向变化[37-38]。

2.3　TIG 焊接 Zr–3 板材的醋酸腐蚀性能

为了深入研究样品与溶液之间的界面信息，进行了 EIS 测试，结果如图 8 所示。交流阻抗测试Nyquist 结果如图 8a 和 b 所示，母材与焊缝的 Nyquist 图均呈现单一容抗弧，说明腐蚀过程受电荷转移控制。通常容抗弧的半径越大，表示无源薄膜阻抗越大，即材料的耐腐蚀性能越好[39]。容抗弧半径随醋酸浓度升高而增大，表明电荷转移电阻 R_{ct} 增加，腐蚀速率减慢；相同浓度下，母材的容抗弧半径略大于焊缝，进一步验证母材腐蚀速率低于焊缝的结论。交流阻抗测试的 Bode 图如图 8c 和 d 所示，一般低频区的总阻抗 $|Z|$ 值越大，表示电荷转移电阻越大，腐蚀速度越慢，其耐腐蚀性能越好[40]。相同浓度下母材的 $|Z|$ 值均大于焊缝，进一步表明焊缝的腐蚀倾向大于母材。

对 EIS 结果进行拟合得到表 3。在 10%醋酸中，母材的电荷转移电阻 R_{ct} 为 0.826 MΩ·cm^2 高于焊缝的 0.674 MΩ·cm^2，证实了母材更优的耐蚀性。在30%醋酸中，两者的 R_{ct} 均有所增加，母材为 1.287 MΩ·cm^2；焊缝为 1.243 MΩ·cm^2，这是由于在浓度更高的酸中钝化膜增厚所致。焊缝的溶液电阻 R_s 始终高于母材，这可归因于焊缝区域的微观结构如晶界和相分布不同，从而影响了离子传输[41]。

不同浓度醋酸溶液中，Zr-3 母材与焊缝的极化曲线特征一致，均包含活性溶解区、钝化过渡区与稳定钝化区(图 9)，无明显点蚀击穿电位，说明 Zr-3 在 10%与 30%醋酸中具有良好的钝化能力。通过 Tafel 外

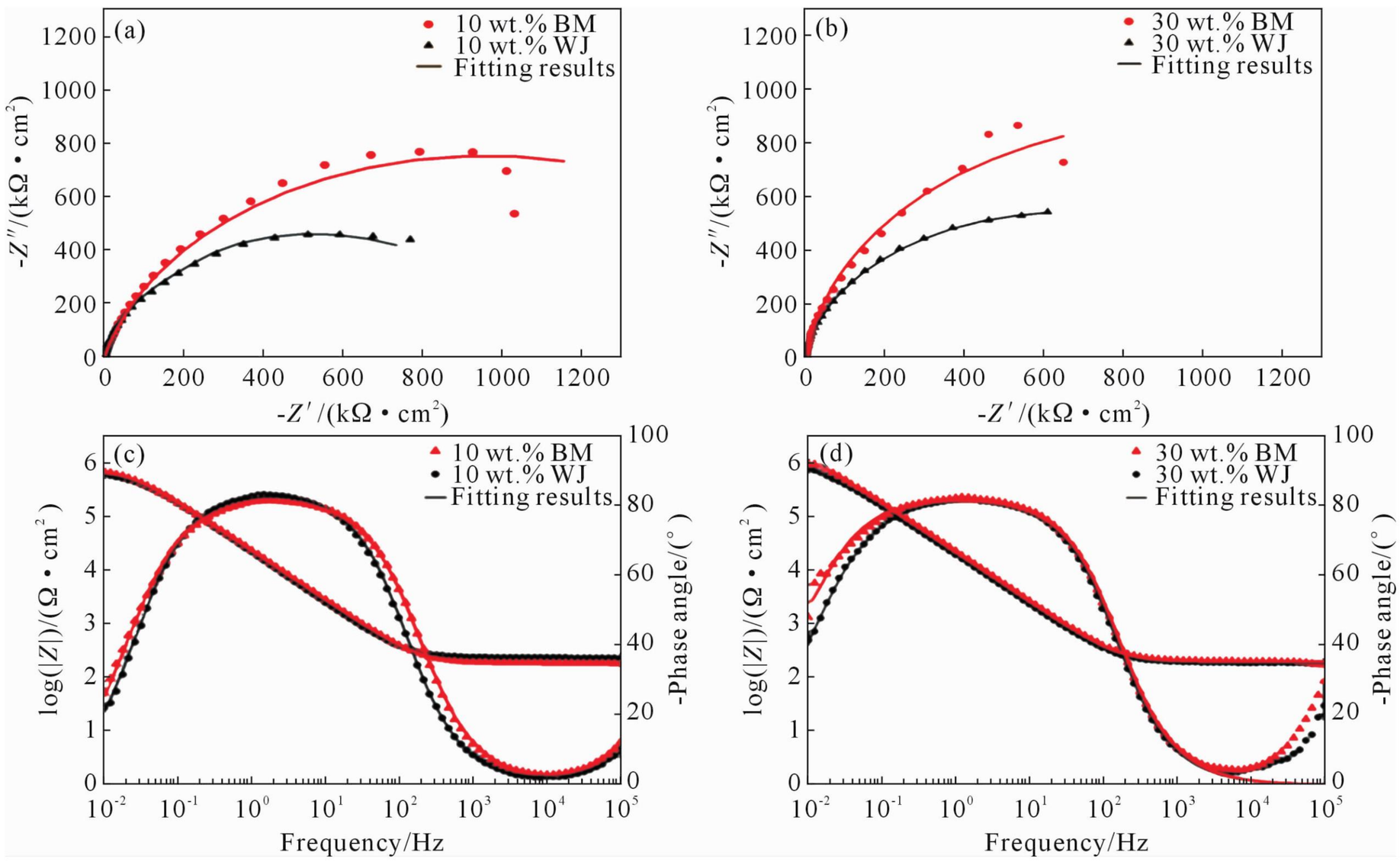


图 8 Zr-3 焊接接头焊缝与母材在不同浓度醋酸溶液中的电化学阻抗谱:(a, b) 焊缝在 10%和 30%浓度下的 bode 图与 Nyquist 图;(c, d) 母材在 10%和 30%浓度下的 bode 图与 Nyquist 图

Fig.8 Electrochemical impedance spectra of the weld joint and base metal of the Zr-3 welded joints in solutions of different concentrations of acetic acid: (a, b) Bode plot and Nyquist plot of the weld zone at concentrations of 10 wt.% and 30 wt.%, respectively; (c, d) Bode plot and Nyquist plot of the base metal at concentrations of 10 wt.% and 30 wt.%, respectively

表3 图8中电化学阻抗谱的拟合结果

Tab.3 Fitting electrochemical impeachment spectroscopy results from Fig.8

Sample	Acetic acid concentration/wt.%	R_s/(Ω·cm²)	CPE/(1×10⁻⁶ Ω·Sn·cm⁻²)	n_1	R_f/(kΩ·cm²)	CPE/(2×10⁻⁶ Ω·Sn·cm⁻²)	n_2	R_{ct}/(MΩ·cm²)
BM	10	215.4±3.2	2.413±0.082	0.998±0.003	0.162±0.005	7.866±0.105	0.922±0.004	0.826±0.023
WZ	10	325.1±4.5	1.876±0.065	0.893±0.006	0.170±0.006	8.052±0.112	0.943±0.004	0.674±0.019
BM	30	242.0±3.6	8.044±0.128	0.923±0.005	1 882.8±12.5	2.685±0.074	0.897±0.004	1.287±0.036
WZ	30	389.4±5.2	9.312±0.145	0.924±0.005	1095.6±9.8	4.022±0.096	0.976±0.003	1.243±0.034

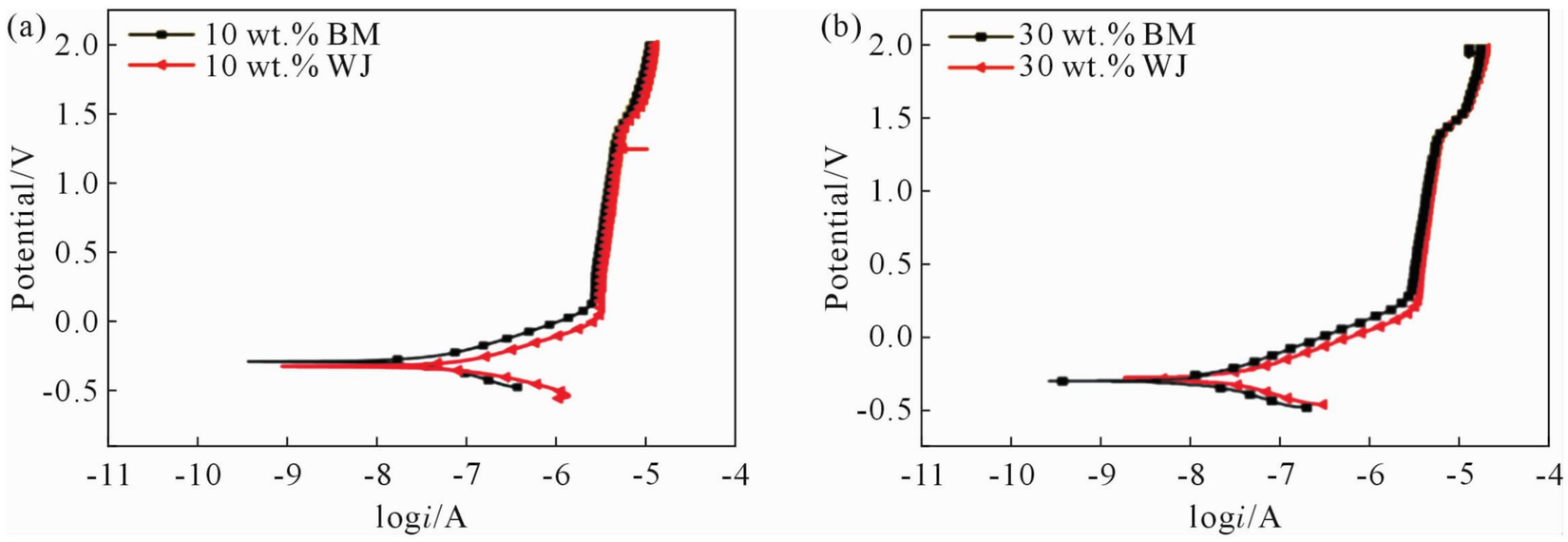


图 9 Zr-3 焊接接头焊缝与母材在不同浓度醋酸溶液中的动电位极化曲线:(a) 10%; (b) 30%

Fig.9 Potentiodynamic polarization curves of the weld joint and base metal of the Zr-3 welded joint in different concentrations of acetic acid solution: (a) 10 wt.%; (b) 30 wt.%

推法得到的自腐蚀电位(E_{corr})与自腐蚀电流密度(I_{corr})如表 4 所示。一般情况下,自腐蚀电位越高,材料的腐蚀倾向越低,而自腐蚀电流密度越小,材料的腐蚀速率越低[42-44]。在 10%醋酸中,母材的E_{corr} 为 -0.233 V 比焊缝的 -0.287 V 负向程度更低, 表明其腐蚀的热力学倾向更小。当醋酸浓度增加到 30%时,两者的 E_{corr} 均变得更负,母材的 E_{corr} 为 -0.291 V,而焊缝的为 -0.365 V,说明更高的醋酸浓度会促进腐蚀反应。由表 3 可知,随醋酸浓度升高,母材与焊缝的 E_{corr} 均负移,I_{corr} 均增大,说明醋酸浓度越高,腐蚀倾向性越强,腐蚀速率越快。相同浓度醋酸中,焊缝的 E_{corr} 比母材负移 50~70 mV,I_{corr} 比母材高 4.0%~4.2%,表明焊缝的腐蚀倾向性略高于母材。实验结果与张建等[45] R60702 焊缝在醋酸介质中耐蚀性弱于母材的实验

表4 Zr–3 母材与焊缝在不同浓度醋酸中的动电位极化曲线拟合结果

Tab. 4 Fitting results of the potentiodynamic polarization curves of the Zr–3 base metal and weld joint with different concentrations of acetic acid

Sample	Acetic acid concentration/wt.%	E_{corr}/V	I_{corr}/(10^{-6} A·cm^{-2})
BM	10	-0.233±0.005	7.255±0.195
BM	30	-0.291±0.008	7.734±0.220
WZ	10	-0.287±0.006	7.573±0.210
WZ	30	-0.365±0.009	8.056±0.185

结果一致。结合法拉第定律计算得出所有试样的腐蚀速率均≤0.01 mm/y[46]，低于 GB/T 150.2-2024《压力容器第 2 部分：材料》规定的醋酸工况下结构材料工业允许腐蚀速率(≤0.025 mm/y)，满足醋酸生产装备用板式换热器的服役要求[47]。

母材与焊缝之间的腐蚀行为差异源于其微观结构的不同。母材保留了原始的细晶结构，相分布均匀，有利于形成致密且稳定的钝化膜。相比之下，焊缝在焊接过程中经历了热循环，导致晶粒长大和可能的相不均匀性，如残余应力和析出相，这削弱了钝化膜的完整性并提高了 R_s。随着醋酸浓度的增加，具有侵蚀性的 H^+ 离子加速了膜的溶解和金属的氧化，导致 E_{corr} 更负、I_{corr} 更高。然而，钝化膜的保护能力在一定程度上得到了增强 (EIS 中 R_{ct} 增加可证明)，因为 Zr 在酸性环境中倾向于形成更稳定的氧化物(如 ZrO_2)。这种双重效应导致在 30%醋酸中观察到更复杂的腐蚀行为。

3　结论

(1)TIG 焊接 Zr-3 板材的组织呈现显著区域差异，母材为 α-Zr 等轴晶，焊缝为 α-Zr 板条魏氏组织，母材 KAM 值为 0.51°高于焊缝的 0.37°，表明母材保留了更多塑性变形储能，而焊缝因重结晶与晶粒长大作用，内部晶格畸变程度更低。

(2)力学性能方面，焊缝的抗拉强度(495.0 MPa)略低于母材(506.0 MPa)。从断裂机制来看，母材为韧性断裂焊缝为韧脆混合断裂；接头硬度存在区域差异，焊缝硬度(202.7 HV)略高于母材(179.8 HV)，热影响区硬度为 159.4 HV，存在一定程度软化。

(3)醋酸腐蚀性能方面，在 10%醋酸中，母材与焊缝的 R_{ct} 和 E_{corr} 分别为 0.826 MΩ·cm^2、0.674 MΩ·cm^2 和 -0.233 V、-0.287 V；在 30%时母材与焊缝的 R_{ct} 和 E_{corr} 分别是 1.287 MΩ·cm^2、1.243 MΩ·cm^2 和 -0.291 V、-0.365 V。随醋酸浓度升高，母材与焊缝的 R_{ct} 均增大，E_{corr} 均负移，I_{corr} 均增大，Zr-3 腐蚀速率加快；相同浓度下，母材的耐腐蚀性能优于焊缝；但是所有试样腐蚀速率均满足工业要求，表明 TIG 焊接 Zr-3 板材适用于醋酸板式换热器。

参考文献：

[1] JIANG N, BIAN H, SONG X G, LEI Y Z, SONG Y Y, LIN D Y, CHEN X K, LONG W M. Recent advances in joining of zirconium and zirconium alloy for nuclear industry[J]. Metals and Materials International, 2024, 30: 2625-2654.

[2] 余存烨. 醋酸的腐蚀及其结构材料选用探讨[J]. 化工设备与管道，2008, 45(6): 53-58.
YU C Y. Discussion of corrosion resulted from acetic acid and selection of structural material [J]. Process Equipment & Piping, 2008, 45(6): 53-58.

[3] 刘莹，韩大明，孙小会. 用于醋酸装置的国内外锆材部分性能对比分析[J]. 河南化工，2015, 32(5): 50-52.

[4] 孙海生，常春梅，卢奇，张棋. 锆制换热器研究进展与前景[J]. 化工设备与管道，2015, 52(2): 54-57.
SUN H S, CHANG C M, LU Q, ZHANG Q. Research progress and prospect of zirconium heat exchanger [J]. Process Equipment & Piping, 2015, 52(2): 54-57.

[5] 左小涛，王国平，雍文佳，张建. 锆 R60702 焊接接头在有机酸中的腐蚀性研究[J]. 金属功能材料，2011, 18(4): 47-50.

[6] ZUO X T, WANG G P, YONG W J, ZHANG J. Corrosive research on zirconium R60702 weld joint in organic acid[J]. Metallic Functional Materials, 2011, 18(4): 47-50.

[7] KUMAR A, CHAKRABORTY P, SARKAR A, ACHARYA S, NEOGY S. Laser welding of PHWR end caps: A characterization study[J]. Nuclear Engineering and Design, 2026, 446: 114616.

[8] 海敏娜，王快社，王文，郝亚鑫，徐瑞琦，李瑶. 纯锆 R60702 板材焊接接头的腐蚀性能研究[J]. 稀有金属，2015, 39(9): 787-792.
HAI M N, WANG K S, WANG W, HAO Y X, XU R Q, LI Y. Corrosion property of pure zirconium R60702 welded joint [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2015, 39(9): 787-792.

[9] TAKASHI S, TAKESHI S. Evolution of nanoscopic iron clusters in irradiated zirconium alloys with different iron contents[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2018, 55(10): 1110-1118.

[10] BARBERIS P, AHLBERG E, SIMIC N, CHARQUET D, LEMAIGNAN C, WIKMARK G, DAHLBÄCK M, LIMBÄCK M, TÄGTSTRÖM P, LEHTINEN B. Role of the second-phase particles in zirconium binary alloys [M]// MOAN G D, RUDLING P. Zirconium in the Nuclear Industry: Thirteenth International Symposium. West Conshohocken: ASTM Special Technical Publication, 2002: 33-55.

[11] ALDEEN A W, CHEN Z W, DISHER I A, ZHU Y, YAN K. Growth kinetics of second phase particles in N36 zirconium alloy: Zr-Sn-Nb-Fe [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 17: 2038-2046.

[12] FU C, WANG Y Q, HE S L, ZHANG C L, JING X. Microstructural characterization and mechanical properties of TIG weld joint made by forged Ti-4Al-2V alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 821: 141604.

[13] 刘继恒，赵明，钱得荣，阎胡成. 魏氏组织铁素体的亚结构及其对裂纹扩展的影响[J]. 金属学报，1986(5): 92-94.

LIU J H, ZHAO M, QIAN D R, YAN H C. Substructure of Widmanstätten ferrite and its effect on crack propagation[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1986(5): 92-94.

[14] 高为国,吴安如,刘金武. ZG230-450 钢魏氏组织的微观结构与力学性能[J]. 金属热处理,2003(4): 39-42.
GAO W G, WU A R, LIU J W. Microstructure and mechanical properties of Widmanstätten structure in ZG230-450 steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2003(4): 39-42.

[15] 高扬,沈艳祥,李哲. Zr-3 的研究进展及应用前景[J]. 科技视界,2016(9): 268, 281.

[16] TIAN X S, WU J, LU Z G, GUO R P, XU L, YANG R. Effects of cooling rate on the microstructure and tensile properties of powder metallurgy Ti_2AlNb alloy[J]. JOM, 2022, 74: 2964-2972.

[17] LIU S Y, ZHANG J Y, KUANG J, BAO X Y, ZHANG D D, ZHANG C L, YANG J K, LIU G, SUN J. Designing hetero-structured ultra-strong and ductile Zr-2.5Nb alloys: Utilizing the grain size-dependent martensite transformation during quenching [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 125: 198-211.

[18] LIU T, MA J Y, LIAO Z N, LIN L, YANG K, LIN X Y, WANG T T, LI Y P, ZHANG H, AI T T. The interaction evolution between thermally activated α precipitates and deformation-induced α′ martensite in a metastable β-Zr alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 29: 523-529.

[19] ZHAO Y L, ZHANG A R, YUE H F, WANG H Q, XIN Y, ZHOU Y. Study of microstructure and performance evaluation of Zr-Sn-Nb joints by electron beam welding[J]. Materials, 2024, 17(5): 980.

[20] MAHLALELA S S. Microstructure and properties of laser beam and gas tungsten arc welded zirconium-2.5 niobium[D]. Pretoria: University of Pretoria, 2018.

[21] LOBANOV M L, YARKOV V Y, PASTUKHOV V I, NASCHETNIKOVA I A, STEPANOV S I, REDIKULTSEV A A, ZORINA M A. The effect of cooling rate on crystallographic features of phase transformations in Zr-2.5Nb[J]. Materials, 2023, 16(10): 3758.

[22] SHI H G, CHEN J Y, LU J Q, ZHU L B, ZHANG L F, LI J X, LU W J, GUO X L. The activation of multiple slip systems in polycrystalline zirconium by using automated lattice rotation framework[J]. Materials Research Letters, 2024, 12(12): 912-920.

[23] SUN H Z, ZHANG Y, SUN C, LI B C, ZHU X Y, SUN Y H, LUAN B F. Quasi-in situ ebsd study of anisotropic mechanical behavior and associated microstructure evolution in Zircaloy-4[J]. Crystals, 2022, 12(10): 1489.

[24] 李智宇,宋国栋,张聪惠,何晓梅,侯智敏,李宁. 纯锆晶界强化的取向依赖性机制研究[J]. 稀有金属材料与工程,2025, 54(8): 2041-2050.
LI Z Y, SONG G D, ZHANG C H, HE X M, HOU Z M, LI N. Orientation-dependent mechanism of grain boundary strengthening in pure zirconium[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2025, 54(8): 2041-2050.

[25] DAYMOND M R, HOLT R A, CAI S, MOSBRUCKER P, VOGEL S C. Texture inheritance and variant selection through an hcp-bcc-hcp phase transformation[J]. Acta Materialia, 2010, 58(11): 4053-4066.

[26] RIFFO A M, VICENTE ALVAREZ M A, SANTISTEBAN J R, VIZCAINO P, LIMANDRI S, DAYMOND M R, KERR D, OKASINSKI J, ALMER J, VOGEL S C. Crystallographic texture and microstructural changes in fusion welds of recrystallized Zry-4 rolled plates[J]. Journal of Nuclear Materials, 2017, 488: 83-99.

[27] UNE K, ISHIMOTO S. Crystallographic measurement of the β to α phase transformation and δ-hydride precipitation in a laser-welded Zircaloy-2 tube by electron backscattering diffraction[J]. Journal of Nuclear Materials, 2009, 389(3): 436-442.

[28] GEY N, HUMBERT M. Specific analysis of EBSD data to study the texture inheritance due to the β→α phase transformation[J]. Journal of Materials Science, 2003, 38: 1289-1294.

[29] BORDONI R A, OLMEDO A M. Microstructure in the weld region in seam welded and resistance welded Zircaloy 4 tubing[J]. Journal of Materials Science,1981,16: 1527-1532.

[30] CAI C, TAO W, LI L Q, CHEN Y B. Weld bead formation and corrosion behavior of pulsed laser welded zirconium alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77: 621-628.

[31] 李顺平,彭倩,杨忠波,陈乐,李卫军. Zr-Sn-Nb 合金薄板焊后组织和力学性能研究[J]. 核动力工程,2017, 38(4): 149-152.
LI S P, PENG Q, YANG Z B, CHEN L, LI W J. Study on microstructure and mechanical properties of Zr-Sn-Nb alloys thin sheet weld[J]. Nuclear Power Engineering, 2017, 38(4): 149-152.

[32] 张肖肖. 基于 ImageJ 的硬质合金晶粒度分析[J]. 机械管理开发,2015, 30(6): 11-13.
ZHANG X X. Analysis of hard-metal grain size base on ImageJ[J]. Mechanical Management and Development, 2015, 30(6): 11-13.

[33] 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(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(5): 83-84.

[34] 张亚峰,张明玉,岳旭,同晓乐,李峰丽,胡雅歌. TA1 纯钛板材组织和拉伸过程分析[J]. 金属世界,2023(6): 73-76.
ZHANG Y F, ZHANG M Y, YUE X, TONG X L, LI F L, HU Y G. Analysis of Microstructure and tensile process of TA1 Pure titanium sheet[J]. Metal World, 2023(6): 73-76.

[35] 韩晓瑞,刘博,王志刚,于宏生,米文俊,张雪伟,王云波,潘胜强. 锆合金包壳管材料的组织与性能研究[J]. 电焊机,2025, 55(6): 132-139.
HAN X R, LIU B, WANG Z G, YU H S, MI W J, ZHANG X W, WANG Y B, PAN S Q. Study on the organization and properties of zirconium alloy cladding tubes for nuclear power generation[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(6): 132-139.

[36] 陆巍巍,陈玉华,黄永德,付强,封小松. 超薄 NiTiNb 记忆合金激光焊焊缝成形及热影响区的组织和性能[J]. 中国有色金属学报,2015, 25(1): 63-71.
LU W W, CHEN Y H, HUANG Y D, FU Q, FENG X S. Laser weld forming of ultrathin NiTiNb shape memory alloy and microstructure and properties of heat-affected zone[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(1): 63-71.

[37] 佟向瑜,徐玮辰,王秀通,王优强,段继周. 常用钛合金焊接接头显微组织结构及对材料性能的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2025, 45(5): 1161-1174.
TONG X Y, XU W C, WANG X T, WANG Y Q, DUAN J Z.

Summary on effect of weling techniques on microstructure and mechanical properties of TC4 Ti-alloy weld jointis[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2025, 45(5): 1161-1174.

[38] YAN A, ZHANG K, WANG G Z, LUAN B F, ZHU X Y, ZHOU H L, XU C R. Study on microstructure inhomogeneity and second phase particles characteristics of Zr alloy joints during non-equilibrium solidification in TIGW[J]. Materials Characterization, 2026, 231: 115840.

[39] ECHOLS J, GARRISON L, SILVA C, LINDQUIST E. Temperature and time effects of post-weld heat treatments on tensile properties and microstructure of Zircaloy-4[J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, 551: 152952.

[40] CUI Y W, CHEN L Y, WANG L Q, CHENG J, ZHANG L C. Response of the metastable pitting corrosion of laser powder bed fusion produced Ti-6Al-4V to H^+ concentration changes[J]. Metals, 2023, 13(3): 514.

[41] 薛海峰,赵佳佳,云中煌,火巧英,朱忠尹,祝鹏飞. A6061-T6 铝合金焊接接头腐蚀行为[J]. 电焊机,2018, 48(5): 54-57, 68.
XUE H F, ZHAO J J, YUN Z H, HUO Q Y, ZHU Z Y, ZHU P F. Corrosion behavior of welded joints of A6061-T6 aluminum alloys [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(5): 54-57, 68.

[42] 罗西希,姚正军,魏东博,李婷,朱俊谋,周文斌. 锆材钨极氩弧焊焊接件腐蚀机理[J]. 稀有金属材料与工程,2014, 43(3): 676-681.
LUO X X, YAO Z J, WEI D B, LI T, ZHU J M, ZHOU W B. Corrosion mechanism of zirconium butt joint by tungsten inert gas welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(3): 676-681.

[43] 严宝辉,崔春娟,肖颖. 退火温度对锆合金耐腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金,2024, 52(6): 69-74, 88.
YAN B H, CUI C J, XIAO Y. Effect of annealing temperature on the corrosion resistance of zirconium alloy[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2024, 52(6): 69-74, 88.

[44] 吴添贤,刘玲,曹瑀成,王思远,陈鼎. 轧制方向对 Zr-Sn-Nb 合金耐腐蚀性能的影响[J]. 热加工工艺,2024, 53(15): 149-154.
WU T X, LIU L, CAO Y C, WANG S Y, CHEN D. Effect of rolling direction on corrosion properties of Zr-Sn-Nb alloy[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(15): 149-154.

[45] 张涛,邹金超,黄志权,赵春江,王军朋. 轧制温度对 AZ61 镁合金耐腐蚀性的影响[J]. 有色金属科学与工程,2023, 14(4): 473-480.
ZHANG T, ZOU J C, HUANG Z Q, ZHAO C J, WANG J P. Effect of rolling temperature on the corrosion resistance of AZ61 magnesium alloy[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2023, 14(4): 473-480.

[46] 张建,王国平,左小涛. 锆合金的腐蚀性研究[J]. 精密成形工程,2011, 3(5): 35-38.
ZHANG J, WANG G P, ZUO X T. The corrosion study of zirconium alloys[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3 (5): 35-38.

[47] XU Y Z, TAN M Y. Probing the initiation and propagation processes of flow accelerated corrosion and erosion corrosion under simulated turbulent flow conditions[J]. Corrosion Science, 2019, 151: 163-174.

[48] 章小浒,陈涛,陆戴丁. GB/T 150.2—2024《压力容器 第 2 部分:材料》简介[J]. 压力容器,2025, 42(6): 35-43.
ZHANG X H, CHEN T, LU D D. Brief introduction of GB/T 150.2—2024 Pressure Vessels—Part 2: Materials[J]. Pressure Vessel Technology, 2025, 42(6): 35-43.

(责任编辑:杨浩雪)