

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.005

R60702 锆合金和 Ti6Al4V 钛合金电阻点焊的微观组织与力学性能研究

唐顺安¹, 孙佳奇², 高明月¹, 陈兵兵¹, 罗震²

(1. 中广核铀业发展有限公司, 北京 100029; 2. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300350)

摘要:为实现核能设备的轻量化, 研究锆合金和钛合金的电阻点焊, 并对焊点的成型、焊核的微观组织以及接头的力学性能进行分析。结果表明: 由于母材物理性能的差异, 熔核呈非对称结构, 熔核尺寸与电流正相关, 当电流为 12 kA 时, 直径达到 6.6 mm。熔核中观察到 (Zr, Ti) 固溶体, 在 Ti6Al4V 侧形成纵横交错的微小马氏体。接头拉伸表明接头峰值拉剪载荷随着焊接电流的增加而先增大后减小, 在电流 10 kA 时, 峰值拉剪载荷达到最大值 7.75 kN。而随着焊接电流的增加, 接头断裂特征由脆性断裂向塑性断裂转变, 断裂破坏模式由界面断裂向拉出断裂转变。

关键词:焊接; 锆合金; 钛合金; 微观组织**中图分类号:** TG44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)05-0027-04

Research on Microstructure and Mechanical Properties of R60702 Zirconium Alloy and Ti6Al4V Alloy Resistance Spot Welding Joints

TANG Shunan¹, SUN Jiaqi², GAO Mingyue¹, CHEN Bingbing¹, LUO Zhen²

(1. CGNPC Uranium Resources Co., Ltd., Beijing 100029, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to achieve the lightweight of nuclear energy equipment, resistance spot welding of zirconium alloy and titanium alloy was studied, and the welding formation, the microstructure of the nugget and the mechanical property of the joint were analyzed. The results indicated that the welding joint appeared as an asymmetric nugget due to the differences in the physical properties of the base metal, and the size of the nugget zone had positive relation with the welding current increasing, the nugget zone diameter reached to 6.6 mm when the welding current was 12 kA. (Zr, Ti) solid solution was observed in the nugget, and the crisscrossing micro-martensite was formed in Ti6Al4V side. The tensile result showed that the peak tensile-shear load first increased and then decreased with the current increasing, the peak tensile-shear load reached the maximum value of 7.75 kN when the welding current reached 10 kA. And the fracture characteristics changed from brittle fracture to plastic fracture, the fracture failure mode changed from interfacial fracture mode to pull-out fracture mode with the increase of current.

Keyword: welding; zirconium alloy; titanium alloy; microstructure

0 引言

核动力航空是未来航空领域的一项前沿先进技术, 拥有潜在的巨大优势并面临巨大的挑战。锆合金作为核反应堆结构材料^[1-2], 具有优异的耐腐蚀性能、力学性能、高温稳定性和低中子截面等特点^[3-4], 被广泛应用于化工和核工业。钛合金作为一种轻质合金, 因其优异的力学性能和耐腐蚀性被广泛应用于航空航天领域^[5-7]。锆和钛都具有 HCP 结构, 并在微观上表现出相似性。因此, 锆合金与钛合金的结合可以在保持优异性能的同时实现轻量化设计。在过去的研究中, 研究

人员探索了不同的焊接方法和工艺, 以实现锆合金与钛合金的有效连接。SUN 等^[8]成功地利用钛作为中间层, 实现了 Zr-4 合金的低温扩散连接。在 650 °C 时, 剪切强度达到 294 MPa。LI 等^[9]对 TA1 和 Zr-4 合金表面进行了纳米技术处理, 成功实现了钛和锆的扩散焊接。研究结果表明, 纳米处理后的接头缺陷减少, 抗拉抗剪强度比原接头提高 112.9%。GAREEV 等^[10]对 1 mm 厚的 Zr-4 合金和钛合金 OT4 板材进行了锁孔式电子束焊接, 得到了几乎没有缺陷的焊接接头, 接头强度达到 738 MPa。虽然扩散焊、电子束焊等焊接方法在性能上已经满足了工业需求, 但在实际

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U21B2079)**第一作者简介:** 唐顺安 (1984—), 男, 湖南湘潭人, 工程师, 硕士, 研究方向为锆合金焊接工艺研究, 18566280809@163.com。

生产过程中,扩散焊通常需要较长的焊接时间,导致效率较低;而电子束焊需要真空环境,对设备要求较高。电阻点焊(RSW)作为一种常用的金属连接方法,在汽车、航空以及核燃料领域得到了广泛的应用^[11-15],具有操作简单高效、成本低、焊接质量高等特点。因此,本研究采用电阻点焊工艺开展 R60702 铝合金与 Ti6Al4V (TC4) 钛合金的焊接,并对焊接接头的组织和力学性能进行分析评价。本研究填补了铝合金和钛合金电阻点焊工艺的空白,对核动力航空具有重要的潜在意义。

1 材料和方法

R60702 合金的质量分数为 2.22 wt.% Hf、0.044 wt.% Fe、0.009 wt.% Cr 和余量 Zr, TC4 合金的质量分数为 6.15 wt.% Al、3.96 wt.% V 和余量 Ti。本研究实验采用尺寸为 100 mm × 25 mm × 1 mm 的 TC4 合金作为基材, R60702 合金厚度 1 mm。电极材料采用半径为 8 mm 的圆弧电极。整个焊接过程采用水冷却。焊接前用砂纸对表面进行打磨。R60702 合金置于上电极, TC4 合金置于下电极。实验中设置的焊接参数为:焊接电流分别为 6 kA、8 kA、10 kA、12 kA,焊接压力为 2.4 kN,焊接时间为 80 ms。采用光学显微镜(OM, Smartzoom5)观察 RSW 接头的形貌。利用扫描电子显微镜(SEM)、Sigma 500 和能谱仪(EDS)对其微观结构和元素分布进行了分析。采用 X 射线衍射(XRD, D8 Advanced)对熔核区(NZ)进行物相分析;采用华银 HV-1000A 维氏显微硬度计进行硬度测试;采用 UTM6104 试验机,以 2 mm/min 的速率进行拉伸-剪切试验。拉剪试件尺寸为 100 mm × 25 mm。

2 结果与讨论

接头宏观形貌如图 1 所示。焊接接头表现为非对称熔核,可明显观察到两侧熔核宽度差异,即 TC4 合金侧宽于 R60702 合金侧,主要是由于 R60702 合金与 TC4 合金在导热率和电阻率方面的巨大差异。熔核的运动方向是产生较高热量和表现出较慢散热的区域。随着焊接电流的增大,熔核的尺寸逐渐增大。如图 2 所示,随着焊接电流从 6 kA 增加到 12 kA,熔核的尺寸呈线性增长趋势。熔核的宽度从 4.666 mm 线性增加到 6.667 mm,而熔核的高度从 1.449 mm 线性增加到 1.625 mm。需要注意的是,当焊接电流达到 12 kA 时,焊接过程中会产生大量飞溅,如图 3 所示,在

10 kA 焊接电流下,接头中产生了 (Zr, Ti) 固溶体。此外,从图 4 中可以观察到,熔核中的元素分布均匀,表明获得了良好的冶金结合效果。然而,当热输入较小时,两板之间的界面处存在间隙,无法实现良好的冶金结合。

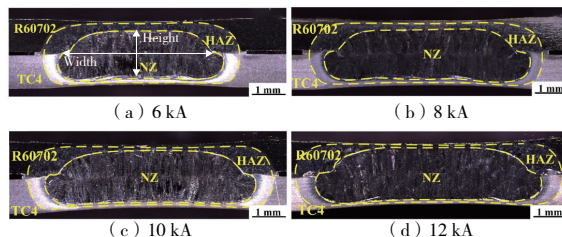


图 1 不同焊接电流下接头的宏观形貌

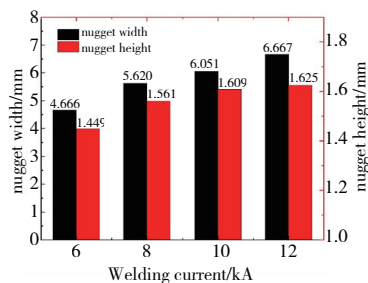


图 2 不同焊接电流下 R60702/TC4 电阻点焊的熔核尺寸

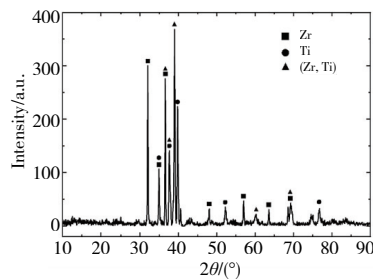


图 3 10 kA 电流下 Zr/TC4 接头的 XRD 分析

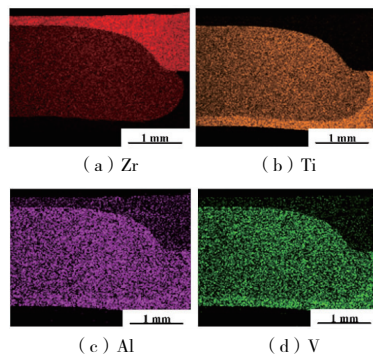


图 4 10 kA 电流下 Zr/TC4 接头的元素分布

图 5 为 R60702 合金、TC4 合金母材和 RSW 焊接接头在不同电流作用下的显微组织。由图 5(a)和图 5(b)可知, R60702 合金由致密排列

的等轴 HCP 组织的 α -等轴晶组成,晶粒直径约为 $40\mu\text{m}$; TC4 合金由均匀分布的等轴暗相 α 和亮相 β 组成。由于最低温度存在于熔池边缘,低熔点溶质优先在这些区域非均质成核。垂直于熔池边缘的成核晶粒在外延生长的驱动下沿相反的冷却方向长大为 β 粗柱状晶粒。随后,在更快的冷却速度驱动下,发生固相转变($\beta \rightarrow \alpha'$)。平行初生马氏体在固相转变初期迅速形核^[16],并在晶界处停止生长。接着,次生马氏体逐渐向垂直于初生马氏体的方向形核生长,形成相互缠绕的组织形态。最终的组织尺寸和形貌受冷却速率的控制。当冷却速率较大时,发生无扩散相变,形成脆硬相 α' 马氏体。随着冷却速率的降低,有形成篮状魏氏组织和平行板状魏氏组织的趋势。热输入的变化既影响柱状晶粒的宽度,也影响魏氏组织和 α' 马氏体的尺寸。 α' 马氏体的尺寸随着热输入水平的增加而扩大,由图 5(c)—图 5(f) 给出最热输入增加,TC4 侧焊核马氏形态的变化,当焊接电流 12 kA 时,马氏体出现显著的粗化。

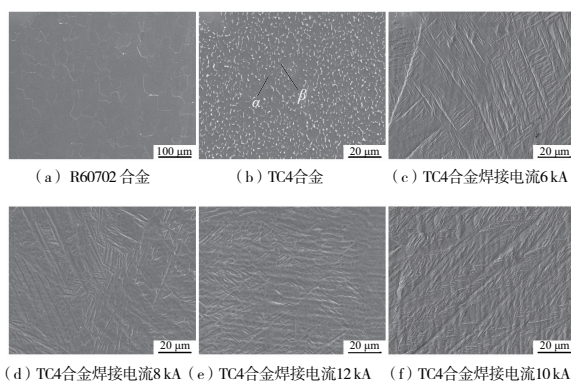


图 5 接头的微观组织

接头的力学性能和断裂特征如图 6—图 9 所示。接头显微硬度分布如图 6 所示。TC4 合金母材和 R60702 合金母材的显微硬度约为 $360\text{HV}_{500\text{g}}$ 和 $235\text{HV}_{500\text{g}}$,而熔核的显微硬度约为 $340\text{HV}_{500\text{g}}$ 。焊接过程中形成的显微组织对焊接接头的显微硬度值有显著影响。R60702 合金基体由

α -等轴晶粒中密集排列的等轴 HCP 组织组成,而熔核组织由魏氏组织和 α' 马氏体组成,具有较高的硬度。图 7 为峰值荷载数据,图 8 描述了在拉剪应力测试中观察到的断裂破坏模式,图 9 为 6 kA~12 kA 焊接电流下 R60702 合金和 TC4 合金的断口形貌。随着热输入的增加,平均峰值负荷逐渐上升。焊接电流为 6 kA 时,平均峰值负荷为 4.29 kN,失效模式为界面失效模式^[17]。此时断裂面呈河流状,属于脆性断裂。在焊接电流为 8 kA 时,平均峰值荷载为 6.51 kN,并伴有部分界面破坏模式。断口表面出现大量韧窝,属于塑性断裂。在焊接电流为 10 kA 和 12 kA 时,平均峰值荷载分别达到 7.75 kN 和 6.29 kN,失效模式过渡到拉拔失效。焊接电流为 10 kA 时,断口出现大量韧窝,为典型的塑性断口;焊接电流为 12 kA 时,断口出现解理面,表现出脆性断裂特征。值得注意的是,在 12 kA 时剪切峰值负荷显示减少,这与焊接过程中发生的内部飞溅缺陷有关,同时也和焊核内马氏体组织的粗化密切相关。

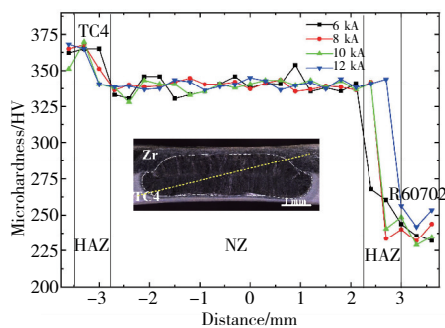


图 6 接头硬度分布

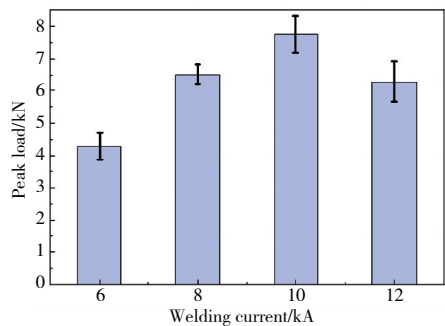


图 7 接头峰值载荷

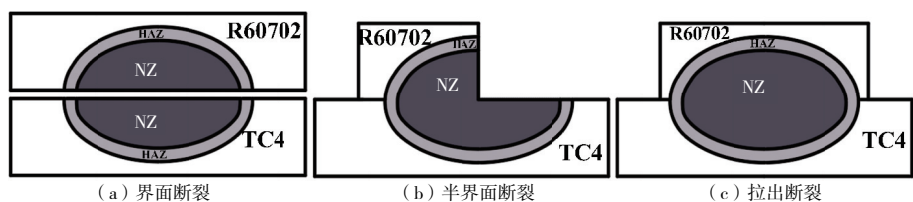


图 8 接头断裂模式

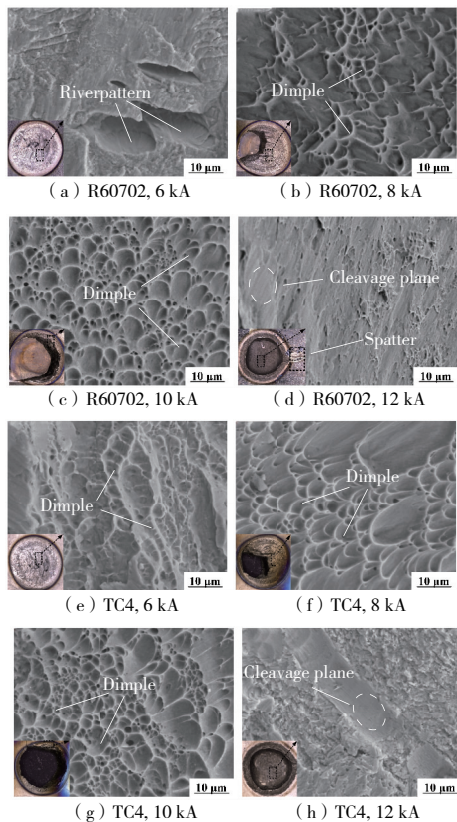


图9 6 kA~12 kA 焊接电流下断口形貌

3 结语

1) 研究采用电阻点焊制备了 R60702 合金和 TC4 合金在不同参数下的成型接头, 接头呈非对称核块, 并产生 (Zr, Ti) 固溶体, 熔合区由魏氏组织和 α' 马氏体组成。

2) 随着焊接电流的增大, 接头的峰值拉剪载荷先增大后减小, 当焊接电流为 10 kA 时, 接头力学性能最佳, 拉伸剪切峰值荷载达到 7.75 kN。

3) 大热输入下接头具有良好的力学性能, 断口表面有大量的韧窝, 显示出典型的塑性断裂行为。随着焊接电流的增大, 断裂破坏模式由界面破坏模式转变为部分界面破坏模式, 再转变为拉出破坏模式。

参考文献:

- [1] YANG J N, ZHANG L J, NING J, et al. Fiber laser welding characteristics of commercially pure zirconium (R60702) and structure - mechanics - corrosion performances of the joint [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2018, 73: 58-73.
- [2] WANG H, WANG Z, CHEN G, et al. Diffusion bonding of Zr-2.5Nb zirconium alloy and 304L stainless steel with Nb/Ni hybrid interlayer [J]. Materials Letters, 2022, 324: 132652.

- [3] 包春玲, 金德华, 张有为, 等. 铝及铝合金铸造工艺与成型技术研究进展 [J]. 材料导报, 2024, 38 (增刊 2): 377-381.
- [4] 严宝辉, 崔春娟, 肖颖. 退火温度对铝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.
- [5] LI Z, ZHAO W, ZHANG H, et al. Microstructure and corrosion resistance of fusion zone in Ti-6Al-4V alloy welded using pulsed- and continuous-wave lasers [J]. Corrosion Science, 2023, 220: 111269.
- [6] SUBBARAO R, CHAKRABORTY S. Microscopic studies on the characteristics of different alloys suitable for gas turbine components [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5 (5): 11576-11584.
- [7] 吴韬文, 王宁, 陈明和, 等. TC4 钛合金高温流变行为及微观组织演变研究 [J]. 机械制造与自动化, 2022, 51 (6): 36-39.
- [8] SUN Z, MA Y K, HE Y J, et al. Phase transition induced low temperature diffusion bonding of Zr-4 alloy using a pure Ti interlayer [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 947: 169387.
- [9] LI C, SI X Q, BIAN S W, et al. Diffusion bonding of Ti and Zr at ultra - low temperature via surface nano - crystallization treatment [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 785: 139413.
- [10] GAREEV I S, SOBKOV S A, SMIRNOV Y G, et al. Features of welded joints based on zirconium-niobium alloy [J]. Welding International, 2020, 34 (1/2/3): 119-124.
- [11] YANG Y, LUO Z, ZHANG Y X, et al. Dissimilar welding of aluminium to steel: a review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 110: 376-397.
- [12] 钟建伟, 安军靖, 丁怀博, 等. Zr-Sn-Nb-Fe-Cr 与 Zr-Nb-Fe 铝合金电阻点焊工艺及显微组织 [J]. 焊接学报, 2021, 42 (8): 82-90, 102.
- [13] 王诗瑞. 焊接工艺参数对铝合金电阻点焊性能的影响 [J]. 山西冶金, 2024, 47 (4): 75-76, 79.
- [14] 李峰, 王丹. 定位格架电阻焊熔核偏移工艺优化 [J]. 自动化与仪器仪表, 2019 (3): 151-153.
- [15] 钟建伟, 盛国福, 余国严, 等. 压水堆新型燃料组件骨架压力电阻点焊工艺研究 [J]. 热处理技术与装备, 2020, 41 (3): 19-26.
- [16] LI Z, ZHAO W, XIAO G C, et al. Impact of microstructure evolution on the corrosion behaviour of the Ti - 6Al - 4V alloy welded joint using high - frequency pulse wave laser [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 4300-4314.
- [17] POURANVARI M, MARASHI S P H, SAFANAMA D S. Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part II: experimental investigation and model validation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (29/30): 8344-8352.

收稿日期: 2025 - 03 - 05