

Ti6321 合金 TIG 焊接接头组织与动态力学性能研究

宋雨宸¹, 张宇轩¹, 王琳^{1,2,3}, 吴江⁴, 赵登辉⁵, 范丽静¹, 卢晓阳⁶

- (1. 北京理工大学 材料学院, 北京 100081)
- (2. 冲击环境材料技术国家级重点实验室, 北京 100081)
- (3. 爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081)
- (4. 陕西空天动力研究院有限公司, 陕西 西安 710003)
- (5. 中国兵器工业标准化研究所, 北京 100089)
- (6. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 采用钨极氩弧焊 (TIG) 焊接双态组织的 Ti6321 合金, 对未焊接母材、近热影响区母材、热影响区和焊缝区进行显微硬度及静动态力学性能测试, 并对焊接接头动态压缩前后的组织结构进行观察。结果表明: Ti6321 合金经 TIG 焊接后, 热影响区组织为等轴初生 α 相与 β 相+针状马氏体 α' 相构成的近双态组织; 焊缝区为大块 α 相与针状马氏体 α' 相构成的网篮组织, 且晶粒较为粗大。在显微硬度与静态抗压强度方面, 焊接接头热影响区最高, 母材与近热影响区母材次之, 焊缝区最低。母材、近热影响区母材和热影响区冲击吸收功相近, 焊缝区低于前三者。热影响区因形成致密细小的针状马氏体 α' 相, 其硬度与动态抗压强度较高, 变形协调能力弱, 塑性较低。焊缝区粗大的晶粒使动态塑性与动态强度都较低。在 2100~2900 s⁻¹ 动态压缩应变率范围内, 母材、热影响区与焊缝区随着应变率增大, 发生了明显的塑性变形。母材与热影响区中的等轴 α 相由压缩前分布均匀的椭球状转变为方向不一的长条状, 转变程度随着应变率的增大而增大。

关键词: Ti6321 合金; 焊接接头; 显微硬度; 动态强度; 微观组织

中图分类号: TG146.23; TG457.19

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2024)02-017-07

Microstructure and Dynamic Mechanical Properties of Ti6321 Alloy TIG Welded Joints

Song Yuchen¹, Zhang Yuxuan¹, Wang Lin^{1,2,3}, Wu Jiang⁴, Zhao Denghui⁵, Fan Lijing¹, Lu Xiaoyang⁶

- (1. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)
- (2. National Key Laboratory of Science and Technology on Materials under Shock and Impact, Beijing 100081, China)
- (3. State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing 100081, China)
- (4. Shaanxi Province Aerospace and Astronautics Propulsion Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710003, China)
- (5. China Ordnance Industrial Standardization Research Institute, Beijing 100089, China)
- (6. Luoyang Ship Materials Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: Tungsten inert gas (TIG) welding was used to weld the Ti6321 alloy with bimodal microstructure, and the microhardness and static and dynamic mechanical properties of the unwelded base metal, near heat affected zone base metal, heat affected zone and weld metal were tested. The microstructure of the welded joint before and after dynamic compression was observed. The results show that after TIG welding of Ti6321 alloy, the microstructure of the heat affected zone is a nearly bimodal microstructure composed of equiaxed primary α phase and β phase + acicular martensite α' phase. The weld metal has a basket microstructure composed of large blocky α phase and acicular martensite α' phase, while the grains are relatively coarse. The microhardness and static and dynamic compressive strength show that the

heat affected zone of welded joint is the highest, followed by the base metal and the base material near heat affected zone, and the weld metal is the lowest. The energy of

收稿日期: 2024-02-26

基金项目: 国防基础科研项目 (WDZC2022-4)

通信作者: 王琳 (1971—), 女, 副教授。

impact absorption of the base metal near the heat affected zone and the heat affected zone is similar, while the weld metal is the lowest. Due to the formation of dense and fine acicular martensite α' phase in the heat affected zone, its hardness and dynamic compressive strength are high, and its deformation coordination ability is weak, which result in poor plasticity. The coarse grains in the weld metal induce low dynamic plasticity and dynamic strength. When the dynamic compressive strain rate in the range of $2100\sim 2900\text{ s}^{-1}$, the base metal, heat affected zone and weld metal undergo obvious plastic deformation as the strain rate increases. The equiaxed α phase in the base metal and the heat affected zone changes from uniformly distributed ellipsoid before compression to long strip with different directions, and the degree of transformation increases with the increase of strain rate.

Keywords: Ti6321 alloy; welded joint; microhardness; dynamic strength; microstructure

钛合金是一种质轻、比强度高且耐海洋环境腐蚀的金属材 料，被称为“海洋金属”，广泛应用于船舶结构件中^[1-2]。美日俄于 20 世纪将钛合金应用于船体外壳以及潜艇耐压壳体等结构件，大幅提高了舰船的航行稳定性及机动性^[3-6]。船用大型结构件通常需要进行焊接，而焊接接头组织与力学性能的非均匀分布，以及焊接过程中产生的较大焊接内应力，会导致焊件的整体性能较母材存在较大差异。

钛合金焊接可以采用多种方式，如线性摩擦焊^[7-8]、惯性摩擦焊^[9]、激光焊^[10]、电子束焊^[11]以及钨极氩弧焊（tungsten inert gas, TIG）^[12]。不同焊接方式对焊接接头力学性能的影响不同。然而，同种焊接方式下，不同的焊接参数以及焊接母材成分都会导致焊接接头各区域产生不同的力学性能^[12-16]。钛合金焊接接头组织通常可分为焊缝区（weld metal, WM）、热影响区（heat affected zone, HAZ）以及母材（base metal, BM）3 个区域^[17]，根据晶粒长大程度又可分为细晶区（fine grain region, FGR）和粗晶区（coarse grain region, CGR）^[18-19]。钛合金 TIG 在焊接过程中引入氩气，可以保护焊缝不受氧、氮、碳、氢等化学元素的影响，提高焊接接头的硬度、塑性以及抗疲劳性能^[20-21]，其焊接接头中，焊缝区主要由针状马氏体组成的网篮组织构成，晶粒为粗大的柱状晶，内部交错分布有马氏体 α' 相和少量针状 α 相组织；热影响区的组织主要为 $\alpha'+\beta+\alpha$ 相，与焊缝区相比，热影响区内马氏体 α' 相的数量更少且更为细小^[22]。

此外，舰船在航行过程中可能遭受礁石等撞击，作为船体结构件，钛合金焊接接头在服役过程中会受到高应变率极端载荷作用。然而，钛合金焊接接头组织与性能的非均匀分布致使研究困难，对于焊接接头动态力学性能及动态失效机理认识尚不充分，目前国内外关于钛合金焊接接头动态力学性能的研究报道较少^[23-25]。为揭示冲击载荷作用下材料的损伤机理，提高钛合金焊接接头动态力学性能，增强钛合金 TIG 焊接接头在舰船结构件上应用的能力，有必要对冲击载荷作用下钛合金焊接接头的动态力学性能及动态响应行为进行探索。然而，

材料在高应变率下的力学性能与准静态力学性能存在较大差异^[26-27]，对于金属材料，通常需采用分离式霍普金森压杆（split Hopkinson pressure bar, SHPB）研究其动态力学性能，加载应变率一般在 $1000\sim 7000\text{ s}^{-1}$ 。为此，以我国自主研制的高强度钛合金 Ti6321 合金 TIG 焊接接头为研究对象，开展焊接接头微观组织、显微硬度、准静态压缩以及动态压缩试验，分析动态压缩后焊接接头微观组织的变化，研究 Ti6321 合金 TIG 焊接接头组织对其静态力学性能的影响。

1 实验

实验材料为中国船舶集团有限公司第七二五研究所提供的热轧态 Ti6321（Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo）合金板材，规格为 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 。板材经 $980\text{ }^\circ\text{C}/1\text{ h}/\text{AC}$ 固溶处理后为双态组织，如图 1 所示。图 1 中白色等轴状组织为等轴初生 α 相，片层状组织为 α 相与 β 相组成的 β 转变组织。



图 1 Ti6321 合金板材显微组织

Fig.1 Microstructure of Ti6321 alloy plate

采用 TIG 工艺焊接 Ti6321 合金板材。焊丝材料为 Ti6321 合金低组配配套焊丝，焊接坡口形状为开口 50° （单边 25° ）的 X 型坡口，焊接电流为 $100\sim 300\text{ A}$ ，焊接电压为 $10\sim 20\text{ V}$ ，送丝速度为 $50\sim 300\text{ mm}/\text{min}$ ，焊接保护气体为氩气。

采用 HV-1000A 型显微维氏硬度仪测试焊接接头硬

度, 加载载荷 0.98 N, 保载时间 10 s。以焊接接头中心为测试起点, 沿焊接接头两侧以 6 mm 为间隔进行测量, 同一区域测试 10 次以保证测量的准确性。

在板材表面的焊缝区、热影响区、靠近热影响区的母材以及未焊接母材上分别取样制备准静态与动态压缩试样。准静态压缩试验采用 Instron 5985 电子万能试验机, 应变率为 10^{-3} s^{-1} , 试样尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。动态压缩试验采用分离式霍普金森压杆, 试样尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 试验装置及方法参考 GB/T 34108—2017《金属材料高应变速率室温压缩试验方法》。将动态压缩后的试样沿轴向剖开, 按标准方法制备成金相试样, 采用光学显微镜观察显微组织。

2 结果与讨论

2.1 微观形貌

Ti6321 合金焊接接头的宏观形貌如图 2 所示。从图 2 可以明显区分出焊接接头热影响区附近母材、热影响区以及焊缝区。

图 3 为 Ti6321 合金焊接接头热影响区附近母材、热影响区以及焊缝区的显微组织。从图 3 可以看出, 热

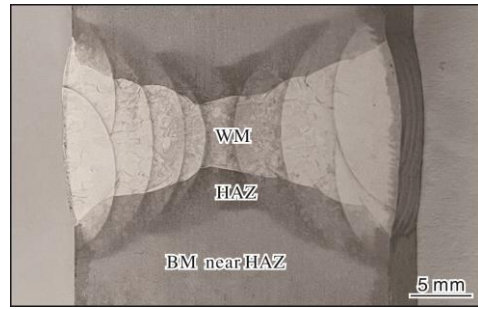


图 2 Ti6321 合金焊接接头宏观形貌

Fig.2 Macromorphology of Ti6321 alloy welded joint

影响区附近母材组织(图 3a)与未焊接母材组织(图 1)基本相同。热影响区因受到较大的焊接热影响, 部分高温 β 相来不及通过扩散转变为平衡 α 相, 只能通过 β 相中的原子作有规律的迁移进而实现切变相变, 转变成细小的针状马氏体 α' 相。母材中 β 转变组织变成由片层 β 相和细小针状马氏体 α' 相交织的黑色组织, 如图 3b 所示。焊缝区则形成由大块状 α 相以及针状马氏体 α' 相共同组成的网篮组织, 且网篮组织晶粒较为粗大, 如图 3c 所示。

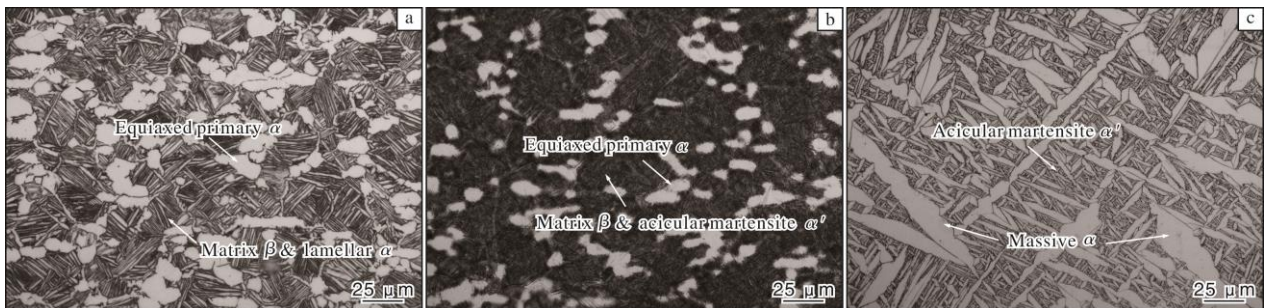


图 3 Ti6321 合金焊接接头显微组织

Fig.3 Microstructures of Ti6321 alloy welded joint: (a) base metal near heat-affected zone; (b) heat affected zone; (c) weld metal

2.2 显微硬度及静动态力学性能

Ti6321 合金焊接接头显微硬度分布情况如图 4 所示。焊接接头各区域显微硬度排序为: 热影响区(均值为 344.7HV0.1) > 母材(均值为 339.6HV0.1) > 近热影响区母材(均值为 332.2HV0.1) > 焊缝区(均值为 311.0HV0.1)。其中, 未焊接 Ti6321 合金母材显微硬度均值为 339.6HV0.1, 介于热影响区与近热影响区母材之间。Ti6321 合金 TIG 焊接接头各区域显微硬度分布与 Karpagaraj 等人^[28]研究的纯钛 TIG 焊接接头硬度分布明显不同, 且 Ti6321 合金焊接接头整体硬度更高。

图 5 为 Ti6321 合金焊接接头准静态压缩真应力-应变曲线。从图 5 可知, 焊接接头各区域准静态抗压强度排序为: 热影响区 > 母材 > 近热影响区母材 > 焊缝区。

图 6 为应变率 2000~2900 s^{-1} 时 Ti6321 合金焊接接头

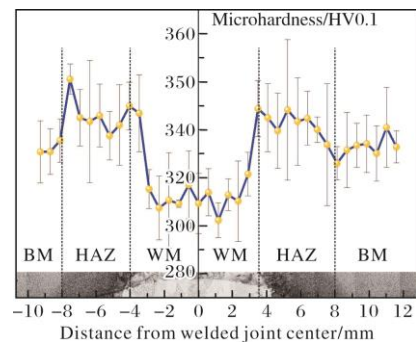


图 4 Ti6321 合金焊接接头显微硬度分布

Fig.4 Microhardness distribution of Ti6321 alloy welded joint

各区域动态压缩真应力-应变曲线。从图 6 可以看出, 母材、近热影响区母材、热影响区以及焊缝区的临界断裂

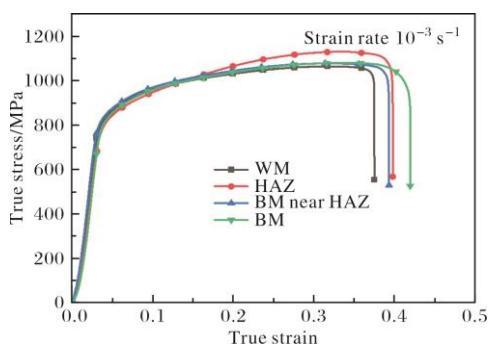


图5 Ti6321 合金焊接接头准静态压缩真应力-应变曲线
Fig.5 True stress-strain curves under quasi-static compressive of Ti6321 alloy welded joint

应变率约为 2800 s^{-1} 。母材、近热影响区母材和焊缝区的动态真应力-应变曲线表现出明显的应变强化效应，热影响区的流变应力几乎不随应变的增加而增加，说明在动态加载过程中，热影响区的热软化作用与加工硬化作用相互制衡。

对 Ti6321 合金动态压缩真应力-应变曲线进行分析计算，获得了焊接接头各区域不同应变率下的平均流变应力、动态抗压强度、塑性应变以及冲击吸收功，将这些数据绘制成点线图，如图 7 所示。从图 7 可以看出，各区域的平均流变应力、动态抗压强度、塑性应变以及冲击吸收功均随着应变率的增加而增加。相同应变率下，热影响区依旧具有最高的动态抗压强度，母材次之，焊缝

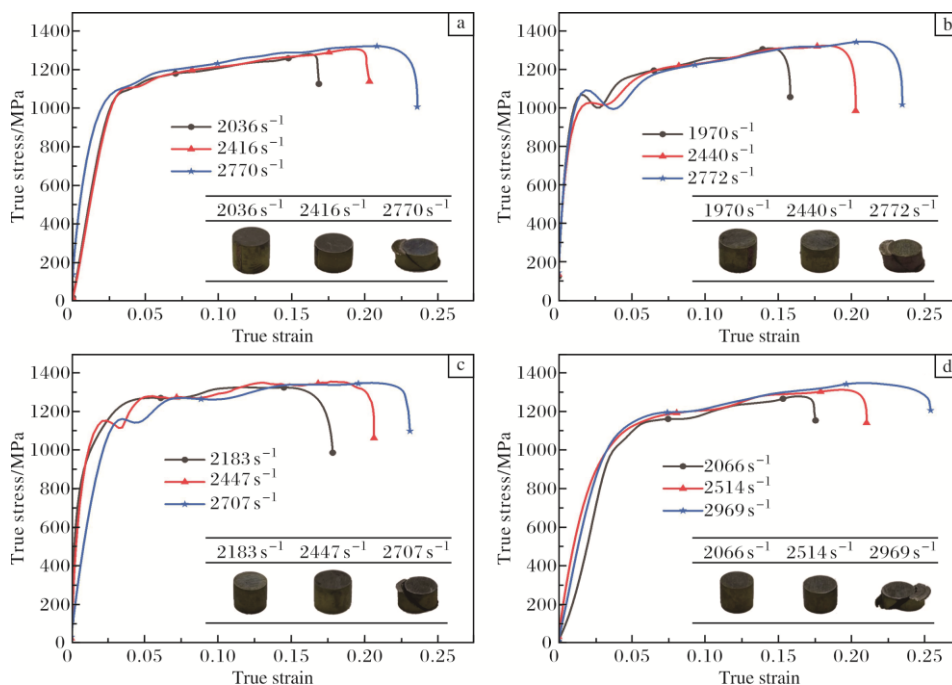


图6 Ti6321 合金焊接接头动态压缩真应力-应变曲线
Fig.6 True stress-strain curves under dynamic compressive of Ti6321 alloy welded joint: (a) base metal; (b) base metal near heat affected zone; (c) heat affected zone; (d) weld metal

区动态抗压强度最低，与准静态抗压强度规律一致。母材与近热影响区母材具有最高的塑性应变，焊缝区以及热影响区的塑性应变较低。母材、近热影响区母材以及热影响区的冲击吸收功变化曲线几乎重合，焊缝区冲击吸收功明显低于前三者。热影响区平均流变应力较高，而其塑性应变较低，故积分后得到的冲击吸收功与母材相近。因此，Ti6321 合金焊接接头的动态强度排序为：热影响区 > 母材 > 近热影响区母材 > 焊缝区，动态塑性排序为：母材 ≈ 近热影响区母材 > 热影响区 > 焊缝区，冲击吸收功排序为：母材 ≈ 近热影响区母材 ≈ 热影响区 > 焊缝区。

分析认为，由于热影响区生成了大量的针状马氏体 α' 相（图 3b），产生了细晶强化效应以及固溶强化作用，

因此热影响区的强度（ 2707 s^{-1} ， 1349.26 MPa ）最高，然而针状马氏体 α' 相纵横交错，位错滑移受阻塞积，变形协调能力较差，较细的针状马氏体 α' 相使位错滑移的有效距离减小，塑性（ 2707 s^{-1} ， 0.199 ）降低^[11]。焊缝区为大块状 α 相以及针状马氏体 α' 相，粗大的晶粒不利于强化效应的形成，使其动态抗压强度及塑性均较低（ 2514 s^{-1} ， 1308.55 MPa ， 0.172 ）。相关研究证明^[29]，钛合金中形成晶粒粗大的网篮组织将使材料的强度、塑性以及韧性显著降低。此外，相关钛合金焊接接头静态拉伸研究表明，网篮组织的焊缝区域也表现出强度与塑性更低的现象^[11-14]。在焊接过程中，近热影响区的母材虽未达到相变点而发生明显的微观组织变化，但焊接时的快速加热

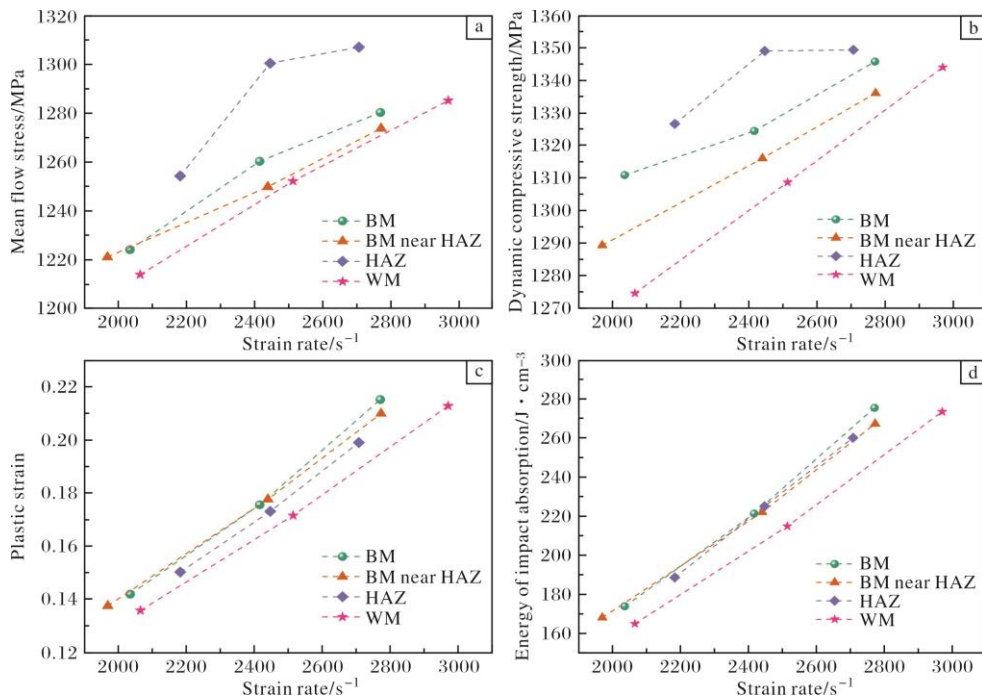


图 7 Ti6321 合金焊接接头动态力学性能随应变率的变化趋势图

Fig.7 Trend charts of dynamic mechanical properties of Ti6321 alloy welded joint changing with strain rate: (a) mean flow stress; (b) dynamic compressive strength; (c) plastic strain; (d) energy of impact absorption

可能使得晶粒发生了回复与再结晶,使 Ti6321 合金板材轧制过程中产生的加工硬化效果减弱,因此强度略低于未焊接母材。

2.3 动态压缩后的显微组织

将动态压缩后的 Ti6321 合金焊接接头沿轴向剖开,观察纵截面的显微组织。其中,母材在试样中心观察,热影响区在试样中心远离焊道接缝处观察,焊缝区在试样中心焊道或晶界附近观察。图 8 为 Ti6321 合金焊

接接头在不同应变率下动态压缩后母材区的显微组织。从图 8 可以看出,母材区试样经动态压缩后,随着应变率增大,发生了一定程度的塑性变形,等轴 α 相由压缩前分布均匀的椭球状转变为方向不一的长条状,转变程度随应变率增大而增大。在断裂前的 2416 s^{-1} 应变率下,试样中未观察到明显的绝热剪切带。随着应变率增大,初生等轴 α 相发生了轻微破碎,变得更加细小。



图 8 Ti6321 合金焊接接头在不同应变率下动态压缩后母材区的显微组织

Fig.8 Microstructures of base metal zone of Ti6321 alloy welded joint after dynamic compression at different strain rates: (a) 2036 s^{-1} ; (b) 2416 s^{-1} ; (c) 2770 s^{-1}

图 9 为 Ti6321 合金焊接接头在不同应变率下动态压缩后热影响区的显微组织。从图 9 可以看出,热影响区组织经过动态压缩试验后,原始微观组织中的初生 α 相

形貌同样发生了由椭球状向长条状的变化,变化与母材区试样类似,在材料发生断裂前同样未观察到明显的绝热剪切带。

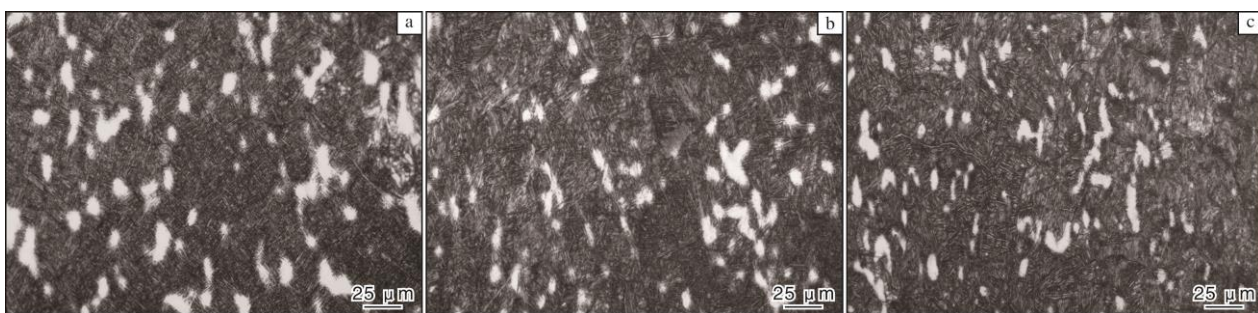


图9 Ti6321 合金焊接接头在不同应变率下动态压缩后热影响区的显微组织

Fig.9 Microstructures of heat affected zone of Ti6321 alloy welded joint after dynamic compression at different strain rates:
(a) 2183 s⁻¹; (b) 2447 s⁻¹; (c) 2707 s⁻¹

图 10 为 Ti6321 合金焊接接头在不同应变率下动态压缩后焊缝区的显微组织。从图 10 可以看出,经动态压缩后的焊缝区组织为粗大的魏氏组织,其中含有大块状 α 相、针状马氏体 α' 相,晶界处还有细密的层片状 α 相

集束。与其他区域相比,经动态压缩后焊缝区组织发生的塑性变形相对不明显,这是由于魏氏组织塑性变形能力较弱,其层片状组织交错排列,导致协调变形能力也较弱。

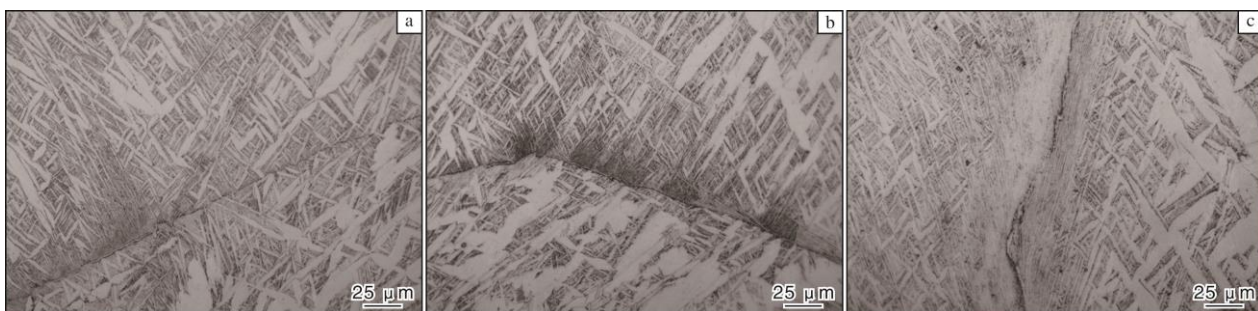


图 10 Ti6321 合金焊接接头在不同应变率下动态压缩后焊缝区的显微组织

Fig.10 Microstructures of weld metal of Ti6321 alloy welded joint after dynamic compression at different strain rates:
(a) 2066 s⁻¹; (b) 2514 s⁻¹; (c) 2696 s⁻¹

3 结 论

(1) Ti6321 合金经 TIG 焊接后,热影响区组织为等轴初生 α 相与 β 相+针状马氏体 α' 相构成的近双态组织。焊缝区为大块 α 相与针状马氏体 α' 相构成的网篮组织,且晶粒较为粗大。

(2) Ti6321 合金焊接接头显微硬度与静态抗压强度排序为:热影响区>母材>近热影响区母材>焊缝区。动态塑性排序为:母材≈近热影响区母材>热影响区>焊缝区。母材、近热影响区母材和热影响区的冲击吸收功相近,焊缝区冲击吸收功低于前三者。

(3) 热影响区因形成致密细小的针状马氏体 α' 相,其硬度与动态抗压强度较高,变形协调能力弱,塑性较低。焊缝区粗大的晶粒使动态塑性与动态强度都较低。

(4) 随着应变率增大,母材、热影响区与焊缝区组织发生了一定程度的塑性变形。母材与热影响区中等轴

α 相由压缩前分布均匀的椭球状转变为方向不一的长条状,转变程度随应变率增大而增大。

参考文献 References

- [1] Jiang H Y, Jiang F Q, Wang B, et al. Effects of aging treatment on microstructure evolution and mechanical properties of Ti-6Al-3Nb-2Zr-Mo alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(6): 2002-2009.
- [2] Yan Z W, Zhou Z, Wang L, et al. Research on mechanical response of Ti6321 titanium alloy after shocked by light gas gun[J]. Materials Letters, 2022, 314: 131483.
- [3] 李永华, 张文旭, 陈小龙, 等. 海洋工程用钛合金研究与应用现状[J]. 钛工业进展, 2022, 39(1): 43-48.
- [4] Yan Z W, Wang L, Ning Z X, et al. Evolution of dislocations and deformation twins in Ti6321 titanium alloy under contact explosion[J]. Journal of Materials Research and Technology,

- 2023, 24: 1070-1075.
- [5] Yan Z W, Wang L, Ning Z X, et al. Deformation behaviors and microstructure evolution of Ti6321 alloy under air blast loadings[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 5147-5158.
- [6] 陈军, 王廷询, 周伟, 等. 国内外船用钛合金及其应用[J]. *钛工业进展*, 2015, 32(6): 8-12.
- [7] Jia C L, Wu L H, Xue P, et al. Effect of static annealing on superplastic behavior of a friction stir welded Ti-6Al-4V alloy joint and microstructural evolution during deformation[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 130: 112-123.
- [8] Mironov S, Sato Y S, Kokawa H. Friction-stir welding and processing of Ti-6Al-4V titanium alloy: A review[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(1): 58-72.
- [9] Mukundhan C, Sivaraj P, Petlay V, et al. Investigation on the effect of friction time on microstructural characteristics and mechanical properties of linear friction welded Ti-6Al-4V alloy joints[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(7): 5611-5621.
- [10] 何杨宇, 杨素媛, 包明明, 等. 激光焊接钛合金接头的组织演变和力学行为[J]. *稀有金属*, 2021, 45(8): 914-920.
- [11] 隋楠, 周毅, 张明达, 等. Ti6242 钛合金电子束焊接接头组织和力学性能[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(15): 103-110.
- [12] Vaithyanathan V, Balasubramanian V, Malarvizhi S, et al. Establishing relationship between fusion zone hardness and grain size of gas tungsten constricted arc welded thin sheets of titanium alloy[J]. *SN Applied Sciences*, 2020, 2: 88.
- [13] 石亚一, 隋兴天. TC4 钛合金焊接接头的组织和性能分析[J]. *焊接技术*, 2017, 46(6): 18-21.
- [14] Wang G, Chen Z, Li J, et al. Microstructure and mechanical properties of electron beam welded titanium alloy Ti-6246[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(3): 570-576.
- [15] Yang Z J, Li J X, Hou S S, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of Ti-6Al-2Nb-2Zr-0.4B alloy welded joint using tungsten inert gas welding[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 3129-3139.
- [16] Mehdi B, Badji R, Ji V, et al. Unveiling the residual stresses, local micromechanical properties and crystallographic texture in a Ti-6Al-4V weld joint[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 34(7): 997-1006.
- [17] 穆壮壮, 廖志谦, 余巍, 等. 船用TA5钛合金激光焊接接头组织和性能研究[J]. *材料开发与应用*, 2021, 36(6): 60-66.
- [18] 高福洋, 高奇, 蒋鹏, 等. 超大厚度钛合金电子束焊接熔合区精细组织表征[J]. *中国科学: 技术科学*, 2017, 47(9): 941-945.
- [19] Zhang S L, Ma Y J, Huang S S, et al. Temperature-gradient induced microstructure evolution in heat-affected zone of electron beam welded Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(8): 1681-1690.
- [20] Ren D Q, Jiang Y, Hu X A. Investigation of tensile and high cycle fatigue failure behavior on a TIG welded titanium alloy[J]. *Intermetallics*, 2021, 132: 107115.
- [21] Thang S M, Nam N D, Truong V P, et al. Analyzing the effect of some welding parameters tig to properties and microstructure of titanium materials[C]//Long B T, Kim Y H, Ishizaki K, et al. *Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS2020)*. Cham, Switzerland: Springer, 2021.
- [22] 陆鑫. TC4 钛合金 TIG 焊接接头组织及缺陷分析[J]. *钢铁钒钛*, 2018, 39(4): 74-79+92.
- [23] Liu Y, Dong D Y, Wang L, et al. Strain rate dependent deformation and failure behavior of laser welded DP780 steel joint under dynamic tensile loading[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 627: 296-305.
- [24] Wang H F, Liu S R, Ge X L, et al. Microstructure and impact load performance of friction stir welded joint of AZ31B magnesium alloy[J]. *Key Engineering Materials*, 2020, 866: 54-62.
- [25] Nikulin S A, Rogachev S O, Belov V A, et al. Impact strength of low-carbon steel 09G2S welded joint metal[J]. *Metallurgist*, 2022, 65(11): 1391-1400.
- [26] 宁子轩, 王琳, 程兴旺, 等. 分离式霍普金森压杆加载下不同组织 Ti-6321 钛合金的动态响应行为[J]. *兵工学报*, 2021, 42(4): 862-870.
- [27] 李严星, 王琳, 闫志维, 等. 不同组织 Ti6321 钛合金在低温高应变速率下的变形和断裂行为[J]. *兵工学报*, 2022, 43(12): 3221-3227.
- [28] Karpagaraj A, Shanmugam S N, Sankaranarayanan K. Some studies on mechanical properties and microstructural characterization of automated TIG welding of thin commercially pure titanium sheets[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 640: 180-189.
- [29] 王哲, 刘程程, 李海滨. TC21 钛合金网篮组织特征对力学性能的影响研究[J]. *中国材料进展*, 2023, 42(8): 657-661.