

TA5 钛合金 K-TIG 与 A-TIG 焊接接头组织和冲击性能研究

叶建林, 李 宁, 曹思可

(西安优耐特容器制造有限公司, 陕西 西安 710201)

摘要: 采用深熔氩弧焊 (K-TIG) 和活性剂钨极氩弧焊 (A-TIG) 两种焊接工艺开展了 22 mm 厚 TA5 钛合金板材的焊接试验。结果表明: K-TIG 与 A-TIG 焊缝组织均主要由编织状的针片 α 相构成, A-TIG 焊缝的柱状晶更加粗大; 两种焊接接头热影响区 (HAZ) 均主要由块状 α 相和少量针片状 α 相构成, 因此 HAZ 具有接近于母材的冲击韧性; TA5 钛合金焊缝对多次加热过程比较敏感, 即多次加热会导致焊缝韧性降低; 与 A-TIG 相比, K-TIG 不但具有更高的焊接效率, 还可以获得更为良好的焊缝冲击韧性, 更适合用于 TA5 钛合金厚板焊接。

关键词: TA5 钛合金; K-TIG; A-TIG; 微观组织; 冲击性能

中图分类号: TG457.19; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)06-037-06

Microstructure and Impact Properties of K-TIG and A-TIG Welded Joints in TA5 Titanium Alloy

Ye Jianlin, Li Ning, Cao Sike

(Xi'an United Pressure Vessel Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

Abstract: Welding experiments on TA5 titanium alloy plates with thickness of 22 mm were conducted using keyhole tungsten inert gas (K-TIG) and activating flux tungsten inert gas (A-TIG) processes. The results show that the weld microstructures of K-TIG and A-TIG joints primarily consist of basket-weave acicular α phase, and the columnar grains in the A-TIG weld are coarser. The heat-affected zone (HAZ) of both welded joints is mainly composed of blocky α phase with a small amount of acicular α phase, resulting in impact toughness comparable to that of the base metal. The TA5 titanium alloy weld exhibits sensitivity to multiple thermal cycles, whereby repeated heating leads to toughness reduction in the weld zone. Compared with A-TIG, the K-TIG process not only achieves higher welding efficiency but also produces welds with better impact toughness, making it more suitable for thick-plate welding of TA5 titanium alloy.

Keywords: TA5 titanium alloy; K-TIG; A-TIG; microstructure; impact property

TA5 钛合金是一种 α 型钛合金, 具有较好的强韧性匹配和优良的耐腐蚀性能^[1], 主要应用于航空、航天以及航海等领域^[2-4]。焊接是实现钛合金应用的关键环节。穆壮壮等^[4]研究发现, 采用激光自熔焊焊接 TA5 钛合金, 接头焊缝主要由粗大的 β 柱状晶、大量针状马氏体 α' 相以及少量板条马氏体组成, 其抗拉强度与母材相当或略高于母材。任泽良等^[5]研究表明, 采用窄间隙氩弧焊焊接 TA5 钛合金, 接头强度可以达到母

材强度的 95.7%, 焊缝组织为锯齿状 α 相。姜明昊^[6]采用搅拌摩擦焊焊接 TA5 钛合金, 接头强度可以达到母材强度的 95%。

上述研究大多采用激光焊、窄间隙氩弧焊或者摩擦焊等方法焊接 TA5 钛合金, 并且聚焦于焊接接头的强度与组织。氩弧焊 (TIG) 是焊接钛合金最常用的方法之一, 其中比较先进的两种氩弧焊焊接方法为深熔氩弧焊 (K-TIG) 和活性剂钨极氩弧焊 (A-TIG)。K-TIG 通过大电流和高冷却效率焊枪, 形成高能量密度电弧, 利用电弧压力与熔池表面张力的动态平衡产生“锁孔效应”, 实现深熔焊接, 能够以更少的焊接道次完成中厚板的焊接^[7]。A-TIG 则是通过焊接前在工件待焊区域表面涂敷活性剂, 以改变熔池表面张

收稿日期: 2025-04-22

基金项目: 陕西省稀有金属装备制造共性技术研发平台项目 (2024ZG-GXPT-02); 秦创原产业聚集区“四链”融合项目 (2024CY-JJQ-46)

通信作者: 李宁 (1986—), 男, 教授级高级工程师。

力,再进行正常的 TIG 焊接。相比普通 TIG 焊接, A-TIG 的电弧明显收缩,致使其能量密度更高,在热输入不变的情况下, A-TIG 熔深更大(可达普通 TIG 的 2~3 倍),焊接效率更高^[8-11]。

目前,关于 TA5 钛合金 K-TIG、A-TIG 焊接以及焊接接头冲击性能的研究报道较少。本研究分别采用 K-TIG 和 A-TIG 两种焊接方法焊接 TA5 钛合金板材,并对其组织和冲击性能进行研究,以期为该钛合金的

推广应用奠定基础。

1 实验

焊接母材为 22 mm 厚的 TA5 钛合金板材,焊丝采用 TA28 焊丝,母材和焊丝的化学成分如表 1 所示。K-TIG 焊接采用 I 型坡口, A-TIG 焊接采用 X 型坡口。焊接工艺参数采用前期研究优化的焊接参数,如表 2 所示。

表 1 母材和焊丝的化学成分 (w/%)

Table 1 Chemical composition of base metal and welding wire

| Grade | Alloying elements | | | | Impurity elements(\leq) | | | | | Other elements | |
|-------|-------------------|---------|---------|-------|-----------------------------|------|-------|-------|------|----------------|------|
| | Ti | Al | B | Fe | C | N | H | O | Each | Total | |
| | TA5 | Bal. | 3.3-4.7 | 0.005 | 0.30 | 0.08 | 0.05 | 0.015 | 0.16 | 0.10 | 0.40 |
| TA28 | Bal. | 2.0-3.0 | — | 0.30 | 0.08 | 0.05 | 0.015 | 0.15 | 0.10 | 0.40 | |

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

| Weld pass | K-TIG | | | A-TIG | | |
|-----------|-------------------|---------------|---|-------------------|---------------|---|
| | Welding current/A | Arc voltage/V | Welding speed / $(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$ | Welding current/A | Arc voltage/V | Welding speed / $(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$ |
| Root pass | 600 | 12-32 | 280 | 149 | 14-15 | 102 |
| Cap pass | 230 | 15 | 90 | 149 | 14-15 | 102 |

在焊接后的试板上截取试样。金相试样按照 GB/T 5168—2020 标准要求加工,经打磨、抛光并腐蚀后采用 OLYMPUS-GX71 型金相显微镜进行组织观察与分析。按照图 1 和图 2 所示分别在 K-TIG 和 A-TIG 两种焊接试板的母材、焊缝及热影响区 (HAZ) 截取冲击

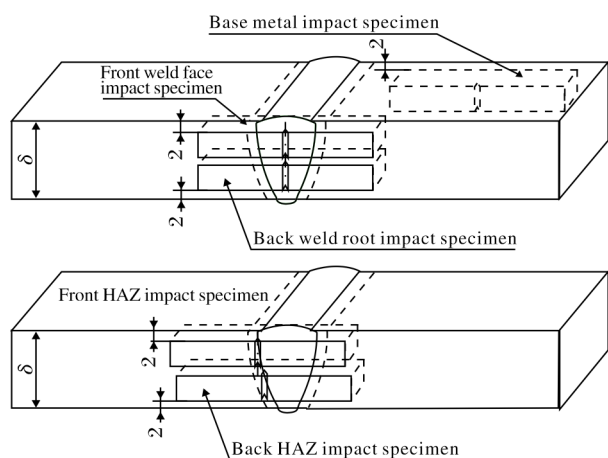


图 1 K-TIG 焊接试板焊缝及 HAZ 冲击试样取样示意图

Fig.1 Sampling diagrams of weld bead and HAZ impact specimens in K-TIG welding test plate

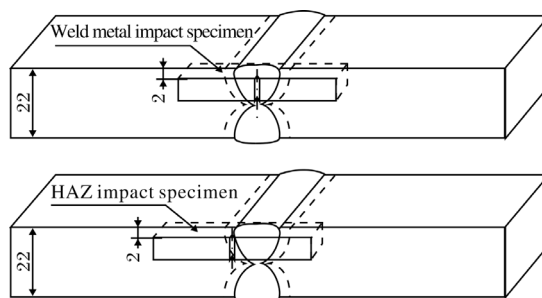


图 2 A-TIG 焊接试板焊缝及 HAZ 冲击试样取样示意图

Fig.2 Sampling diagrams of weld bead and HAZ impact specimens in A-TIG welding test plate

试样。由于 K-TIG 焊缝上、下部分的焊接过程不同,因而分别于焊缝上部和下部两处取样,以比较其冲击韧性的差异。按照 GB/T 19748—2019 标准要求,采用 TYPE-JBC-250 型示波冲击试验机进行示波冲击试验,标准打击能量为 250 J,打击瞬间摆锤的冲击速度为 5.12 m/s。冲击试验过程中,通过压缩机冷却方式进行试样冷却,将试样置于酒精槽内进行温度控制。试样冷却至试验要求的 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,保温 10 min,迅速由冷却槽转移至试样托架并在 10 s 内进行试验。试验过

程中采集载荷-位移曲线。本研究以冲击过程中记录的最大载荷为冲击裂纹的启裂载荷。图 3 为示波冲击试验的载荷-位移曲线示意图及相关参数, 其中 F_{gy} 为屈服载荷, F_m 为最大载荷, W_i 为裂纹形成能量, W_p 为裂纹扩展能量, W_i+W_p 为冲击总能量 W_t 。

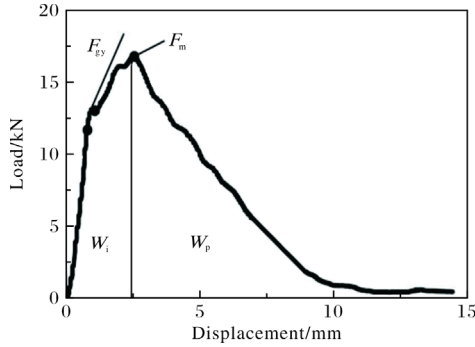


图 3 示波冲击试验曲线及相关参数

Fig.3 Curve and related parameters of oscillographic impact test

2 结果与分析

2.1 宏观形貌

图 4 为 TA5 钛合金 K-TIG 和 A-TIG 焊接接头的宏观形貌。由于 TA5 钛合金的导热性相对较差, 焊接过程中熔池容易过热, 焊缝晶粒在形成时 (液相→ β 相) 容易粗化, 因而 K-TIG 和 A-TIG 焊接接头焊缝均由粗大柱状晶构成。对比图 4a、4b 可以看出, A-TIG 的柱状晶更为粗大。一方面是由于 K-TIG 焊接的“锁孔效应”使得熔池窄而深, 且总的热输入量比 A-TIG

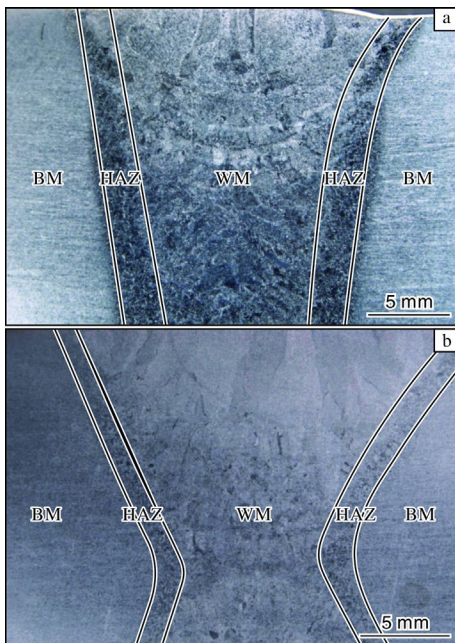


图 4 TA5 钛合金焊接接头宏观形貌

Fig.4 Macrostructures of TA5 titanium alloy welded joints: (a) K-TIG; (b) A-TIG

更小; 另一方面, 虽然 A-TIG 单道热输入量小, 但焊缝经历多次热循环, 促使焊缝晶粒二次异常长大, 形成毫米级的超大晶粒。

此外, K-TIG 焊接接头的 HAZ 宽度大于 A-TIG 焊接接头, 这与 A-TIG 焊接多层多道的焊接方式有关。由于 A-TIG 焊接每道焊接热输入均处于较低的水平, 因而 HAZ 相对较窄, 而 K-TIG 焊接除盖面层以外, 填充层为大熔深的单道焊接, 且单道热输入量大, 故形成的 HAZ 更宽。

2.2 微观组织

图 5 为 TA5 钛合金母材的微观组织。从图 5 可以看出, 由于板材轧制过程中, 大量 α 晶粒被拉成与轧制方向平行的长条状, 故 TA5 钛合金母材显微组织由长条状 α 相+少量等轴 α 相组成。

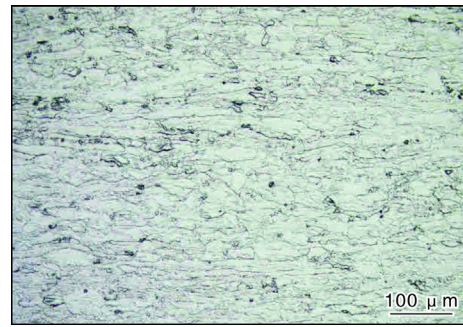


图 5 TA5 钛合金母材微观组织

Fig.5 Microstructure of TA5 titanium alloy base material

图 6 为 TA5 钛合金 K-TIG 和 A-TIG 焊接接头的微观组织。从图 6 可以看出, K-TIG 和 A-TIG 焊缝组织均由针片 α 相构成, 是焊缝金属凝固形成的粗大柱状原始 β 晶粒在 β 相变点以下以中等或较快的冷却速度发生 α 相变形成的。在 α 相变过程中, 由于 β 晶粒内部不同位置的过冷度、成分和应力状态存在差异, 多个不同取向的 α 变体几乎同时形核并穿插生长, 形成编篮状的针片 α 相。HAZ 组织则均主要由粗大块状 α 相构成, 针片状 α 相相对较少。HAZ 组织转变较为复杂, 一方面, 焊接热循环为粗大块状 α 相形成提供了充足的能量条件; 另一方面, 这种组织很可能是由母材中非稳态的长条 α 相通过溶解—断裂—扩散粗化—外延生长形成的。

2.3 冲击性能

常规冲击试验时, 往往会将冲击吸收能量相同的材料同等对待, 很难反映其韧性的优劣, 其示波冲击曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出, 3 条示波冲击曲线的冲击吸收能量相等, 但所反映的细节各不相同, 曲线 1 显示弹性变形能量在冲击总能量中占有相当大的比例, 塑性变形能量很小, 裂纹扩展能量几乎为零,

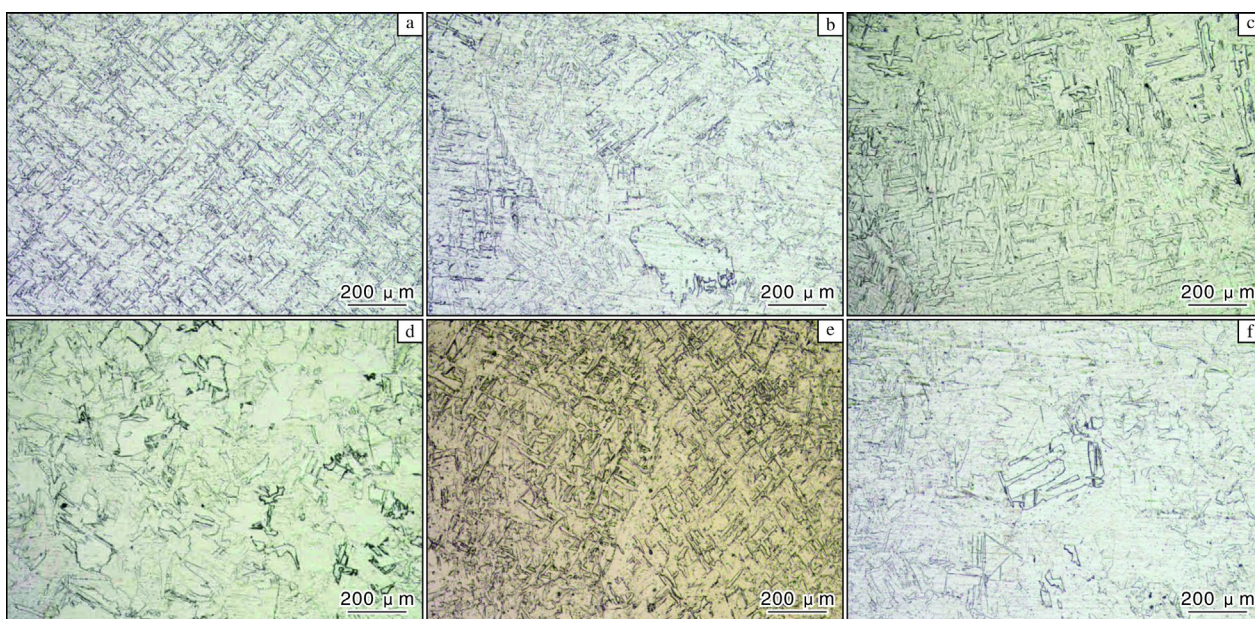


图 6 TA5 钛合金 K-TIG 和 A-TIG 焊接接头的微观组织

Fig.6 Microstructures of TA5 titanium alloy welded joints by K-TIG and A-TIG: (a) root pass weld metal by K-TIG; (b) root pass HAZ by K-TIG; (c) cover pass weld metal by K-TIG; (d) cover pass HAZ by K-TIG; (e) weld metal by A-TIG; (f) HAZ by A-TIG

说明裂纹一旦形成，就会立刻失稳扩展，直至断裂，显示出材料的脆性性质；在曲线 2 中，材料的弹性变

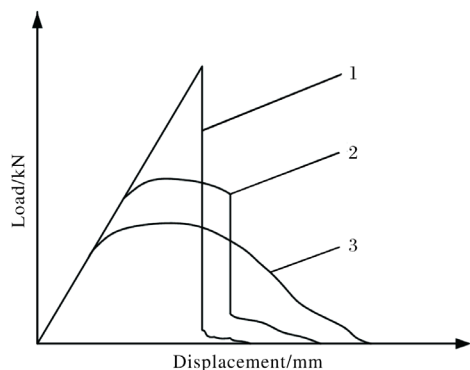


图 7 相同冲击吸收能量不同韧脆性材料的示波冲击曲线

Fig.7 Oscillographic impact curves of materials with same impact energy but different toughness and brittleness

形能量比曲线 1 小，塑性变形能量增加，裂纹扩展能量也有一定的增加，当裂纹发展到一定尺寸后，才产生失稳扩展，表现出材料的半脆性；在曲线 3 中，材料的弹性变形能量较小，裂纹扩展能量进一步增加，裂纹产生后缓慢扩展，直至断裂也不产生失稳，充分显示出材料的韧性性质。由此可见，对于示波冲击试验，通过分解冲击总能量的方法能够比较清楚地表达冲击吸收能量的物理意义。其中，塑性变形能量，尤其是裂纹扩展能量，能够真正反映被测材料的韧脆性质。因此，本研究对 TA5 钛合金 K-TIG 及 A-TIG 焊接接头各位置进行了一 10 °C 的示波冲击试验，试验过程中记录了各试样的载荷-位移曲线，见图 8。同时，经计算得到示波冲击关键参数，包括最大力 F_m 、屈服力 F_{gy} 、冲击吸收能量 A_k 、冲击总能量 W_t 、裂纹形成能量 W_i 、裂纹扩展能量 W_p ，见表 3。从图 8 和表 3 可

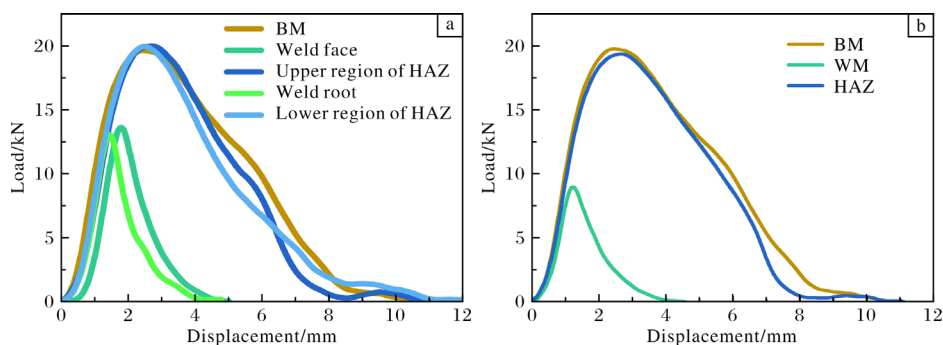


图 8 K-TIG 和 A-TIG 焊接接头示波冲击载荷-位移曲线

Fig.8 Oscillographic impact load-displacement curves of welded joints: (a) K-TIG; (b) A-TIG

表 3 示波冲击试验关键参数
Table 3 Key parameters of oscillographic impact tests

| Welding process | Notch location | Specimen number | F_m/kN | F_{gy}/kN | A_k/J | W_i/J | W_i/J | W_p/J |
|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| K-TIG | Weld face | 1-1 | 13.69 | 13.25 | 22.70 | 20.83 | 8.27 | 12.56 |
| | | 1-2 | 13.04 | 12.75 | 21.30 | 19.30 | 7.47 | 11.83 |
| | | 1-3 | 14.22 | 13.83 | 23.30 | 21.82 | 8.86 | 12.96 |
| | Weld root | 2-1 | 13.12 | 12.85 | 18.30 | 18.20 | 7.22 | 10.98 |
| | | 2-2 | 13.43 | 13.10 | 17.20 | 18.20 | 7.23 | 10.97 |
| | | 2-3 | 12.91 | 12.60 | 17.50 | 18.72 | 7.11 | 11.61 |
| | Upper region of HAZ | 3-1 | 20.09 | 17.09 | 85.20 | 84.49 | 30.34 | 54.15 |
| | | 3-2 | 19.81 | 17.27 | 82.10 | 80.66 | 26.27 | 54.39 |
| | | 3-3 | 19.93 | 17.41 | 84.70 | 83.84 | 25.18 | 58.66 |
| | Lower region of HAZ | 4-1 | 20.06 | 17.18 | 86.00 | 85.75 | 26.78 | 58.97 |
| | | 4-2 | 19.93 | 16.50 | 102.00 | 101.40 | 30.92 | 70.46 |
| | | 4-3 | 19.70 | 16.66 | 94.50 | 91.09 | 30.52 | 60.57 |
| A-TIG | Weld metal | 5-1 | 8.94 | 8.70 | 13.70 | 12.64 | 4.27 | 8.37 |
| | | 5-2 | 7.53 | 7.26 | 12.40 | 11.18 | 3.62 | 7.56 |
| | | 5-3 | 9.04 | 8.80 | 14.20 | 12.89 | 4.60 | 8.29 |
| | HAZ | 6-1 | 19.35 | 15.95 | 89.00 | 87.33 | 30.75 | 56.58 |
| | | 6-2 | 18.97 | 15.79 | 93.90 | 91.62 | 26.53 | 65.09 |
| | | 6-3 | 19.78 | 16.14 | 99.40 | 97.91 | 30.39 | 67.52 |
| Base metal | 7-1 | 19.68 | 16.09 | 93.20 | 86.22 | 28.46 | 57.76 | |
| | 7-2 | 19.75 | 16.27 | 95.50 | 95.61 | 27.77 | 67.84 | |
| | 7-3 | 19.72 | 15.89 | 94.20 | 95.37 | 29.77 | 65.60 | |

以看出,对于 K-TIG 和 A-TIG 焊接接头,母材和 HAZ 的 A_k 、 W_i 、 W_p 等示波冲击关键参数值相差不大,焊缝的示波冲击关键参数值则低得多,表明母材和 HAZ 的断裂韧性相当,远优于焊缝,焊缝是抵抗动载断裂最为薄弱的位置。通过分析焊接接头的组织可以发现,母材的 α 相不同于焊缝的编篮状和 HAZ 的块状,而是被拉成与轧制方向平行的长条状,并且就晶粒尺寸来说,母材晶粒最小,HAZ 次之,焊缝最大。可以推测,长条状 α 相+少量等轴 α 相的微观组织和相对细小的晶粒是 TA5 钛合金母材具有良好韧性的重要原因。

焊缝编篮状的针片 α 相所构成的粗大柱状晶很可能是导致焊缝塑性下降的原因。在冲击载荷作用下,粗大的柱状晶更容易形成连续解理面,为裂纹扩展提供通道,降低裂纹形成能量和裂纹扩展能量,裂纹沿解理面快速贯穿晶粒,引发断裂,因而冲击韧性较低。图 9 为 TA5 钛合金 K-TIG 及 A-TIG 焊接接头的冲击吸收能量。从图 9a 可以看出, A-TIG 焊缝的冲击吸收

能量整体低于 K-TIG 焊缝。需要强调的是, K-TIG 焊接接头背面焊缝属于自熔焊接,其冲击吸收能量虽然低于正面填丝焊接的焊缝,但优于 A-TIG 焊缝。这是由于 A-TIG 焊缝的柱状晶更加粗大,晶界数量更少,更有利于杂质元素偏析,导致裂纹扩展阻力减小,韧性降低。

K-TIG 焊接不仅效率高,而且由于“锁孔效应”和更少的热循环次数,焊缝晶粒尺寸更小,具有较 A-TIG 焊接更优的韧性。在 A-TIG 焊接条件下,焊缝的冲击韧性差,说明多次焊接热循环对焊缝冲击韧性具有一定的不利影响。

从图 9b 可以看出, K-TIG 与 A-TIG 焊接接头 HAZ 的冲击韧性均维持在较高水平。虽然 HAZ 的晶粒相比母材更为粗大,但其块状 α 相呈等轴形态,无择优取向,裂纹扩展路径较长并且扩展阻力较大,在一定程度上提升了 HAZ 的冲击韧性,使得 HAZ 具有与母材相近的抗动载断裂的能力。

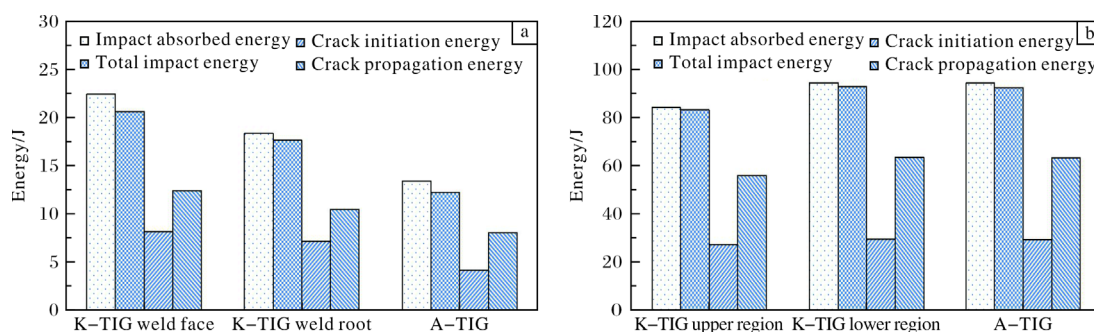


图9 K-TIG 和 A-TIG 焊接冲击性能对比

Fig.9 Impact properties comparison between K-TIG and A-TIG welding processes: (a) WM; (b) HAZ

基于示波冲击试验结果可知,无论是 TA5 钛合金焊缝还是 HAZ,其裂纹扩展能量均高于裂纹形成能量,这说明 TA5 钛合金焊缝和 HAZ 均具有良好的抗裂纹扩展能力。综合分析发现,无论 K-TIG 焊接还是 A-TIG 焊接,其焊缝均是整个接头中韧性最差的位置;HAZ 与母材冲击韧性相当,其冲击吸收能量均维持在较高的水平。与 A-TIG 焊接相比,K-TIG 焊接不但具有更高的焊接效率,其示波冲击的裂纹形成能量和裂纹扩展能量也更高,拥有更为良好的焊缝冲击韧性,更适合用于 TA5 钛合金厚板的焊接。

3 结论

(1) 无论 K-TIG 焊接还是 A-TIG 焊接,TA5 钛合金焊缝是焊接接头中韧性最差的位置;HAZ 与母材冲击韧性相当。

(2) TA5 钛合金母材、HAZ 及焊缝的冲击裂纹扩展能量均高于裂纹形成能量,均具有一定的抗裂纹扩展能力。

(3) TA5 钛合金 K-TIG 和 A-TIG 焊接接头 HAZ 的组织均主要由粗大块状 α 相和少量针片状 α 相构成,大量块状等轴 α 相是其韧性接近母材的主要原因。

(4) TA5 钛合金焊缝对多次加热过程比较敏感,即多次加热会导致焊缝韧性降低。与 A-TIG 焊接相比,K-TIG 焊接不但具有更高的焊接效率,还可以获得更为良好的焊缝冲击韧性,更适合用于 TA5 钛合金厚板的焊接。

参考文献 References

- [1] 杜帅帅. TA5 钛合金动支撑倾斜穿透搅拌摩擦焊接机理及接头组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [2] 雷小伟, 刘甲, 余巍, 等. TA5 钛合金万瓦光纤激光焊接工艺研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(2): 417-423.
- [3] 康聪, 李进元, 任驰强, 等. 成形及退火温度对 TA5 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 湖南有色金属, 2021, 37(1): 50-52.
- [4] 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.
- [5] 任泽良, 王刚, 李娟, 等. TA5 钛合金窄间隙 TIG 焊接接头组织和性能的研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(21): 158-161.
- [6] 姜明昊. TA5 钛合金搅拌摩擦焊接接头微观组织及力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [7] 石永华, 王天序, 詹家通. K-TIG 焊接研究现状[J]. 焊接学报, 2024, 45(11): 35-44.
- [8] 刘元昊, 任昌敬, 向彦君, 等. 活性剂对 A-TIG 接头熔深、电弧形貌及组织性能的影响[J]. 材料导报, 2025, 39(1): 254-258.
- [9] 洪浩洋, 赵晖, 王军, 等. 钛合金 A-TIG 焊接工艺的应用研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2015, 34(5): 12-18.
- [10] 吴飞虎, 张鹏飞, 余刚, 等. 钛合金 A-TIG 焊工艺技术研究[J]. 世界有色金属, 2024(16): 17-19.
- [11] Niagaj J. Use of A-TIG method for welding of titanium, nickel, their alloys and austenitic steels[J]. Welding International, 2006, 20(7): 516-520.