

热处理对TC4钛合金K-TIG焊接接头组织及性能的影响

陈佳庆¹, 李嘉渊², 陈永吉³, 陈佳乐¹, 王飞¹, 刘红兵¹

(1. 上海工程技术大学材料科学与工程学院, 上海 201620; 2. 海盐县科技服务中心, 浙江 嘉兴 314300;

3. 浙江新盛达金属科技发展股份有限公司, 浙江 嘉兴 314300)

摘要: 采用小孔钨极惰性气体保护焊(K-TIG焊)工艺对厚度为6 mm的TC4合金进行自熔对接焊, 然后针对焊接接头进行4种不同方式的热处理, 探讨不同热处理方式对接头显微组织和力学性能的影响。结果表明: 热处理后接头的熔合区(FZ)和热影响区(HAZ)的显微组织均发生了明显变化, 应力退火(SRA)处理后接头的FZ和HAZ区中的 α_3' 相出现部分溶解现象, 而固溶+时效(SSTA)处理后FZ区析出了晶界 α 相, 一次 α 相和二次 α 相, 而经过水淬+回火(WQT)与油淬+回火(OQT)处理后则析出了板条 α 相以及残留 β 相。热处理后焊接接头的最大抗拉强度均降低, 显微硬度相比于焊接态都有明显增大, 而经过WQT和OQT处理后的接头显微硬度提高最为明显, 可达500~600 HV0.2。

关键词: TC4合金; K-TIG焊接; 热处理; 力学性能

中图分类号: TG166

文献标志码: A

文章编号: 1008-1690(2025)06-0013-08

Study on the Microstructure and Properties of TC4 Titanium Alloy K-TIG Welded Joints After Heat Treatment

CHEN Jiaqing¹, LI Jiayuan², CHEN Yongji³, CHEN Jiale¹, WANG Fei¹, LIU Hongbing¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Haiyan Science and Technology Service Center, Jiaxing 314300, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Xinshengda Metal Technology Development Co., Ltd., Jiaxing 314300, Zhejiang, China)

Abstract: Using K-TIG welding to perform self-fusion butt welding on a TC4 alloy plate with the thickness of 6 mm, and then conducting four different heat treatments on the welded joints to investigate the effects of different heat treatment methods on the microstructure and mechanical properties of the joints. The results show that the microstructure of the fusion zone (FZ) and the heat affected zone (HAZ) of the joints has undergone significant changes after the heat treatment. The α_3' phase in the FZ and HAZ of the joint partially dissolved after SRA treatment, while the grain boundary α phase, primary α phase and secondary α phase were precipitated after SSTA treatment. Lamellar α phase and residual β phase were precipitated after WQT and OQT treatments. The maximum tensile strength of the welded joints after heat treatment all decreased, and the microhardness was significantly increased compared to the welded state. The microhardness of the joints after WQT and OQT treatments increased the most, reaching 500~600 HV0.2.

Key words: TC4 titanium alloy; keyhole tungsten inert gas (K-TIG) welding; heat treatment; mechanical properties

收稿日期: 2025-04-04

基金项目: 国家大学生创新训练项目(202410856022); 上海工程技术大学大学生创新训练项目(cx2405010)

作者简介: 陈佳庆(2003—), 男, 本科生, 主要研究方向为材料加工(焊接)。E-mail: 2150424068@qq.com

0 引言

TC4合金(Ti-6Al-4V)是一种 $\alpha+\beta$ 双相钛合金,具有优异的强度特性、良好的耐腐蚀性和出色的耐高温性能,常用于航空航天、船舶制造等领域^[1-3]。K-TIG焊是一种利用较大电流产生高能量密度电弧来实现深熔焊接的焊接工艺^[4]。在焊接热过程会产生不均匀的微观结构,并且在焊接过程中产生的相变会引起力学性能发生改变,进而降低焊接接头的稳定性,因此TC4合金K-TIG焊接接头需要热处理来进一步提升性能^[5]。

TC4钛合金在经过不同的加热温度、加热速度、保温时间和冷却速率进行热处理后,得到了有显著差异的显微组织^[6-7]。当前,TC4钛合金主要的热处理方式包括退火处理、固溶处理、时效处理和淬火处理,其核心目标存在一定共性。根据退火温度的区别,退火处理分为去应力退火和完全结晶退火^[8]。该工艺主要目的在于消除工件内部的残余应力,同时通过再结晶的方法,获得完全的等轴细小 α 晶粒。固溶处理的方法是将合金加热到相变温度左右并保温一段时间,然后随炉自然冷却^[9]。通过该工艺可以实现元素的全部固溶强化,得到等轴的 α 晶粒和少量残留 β 相。时效处理的方法是将合金置于较低环境温度下长时间保温,然后随炉缓慢冷却,其主要作用是消除因焊接或其他处理产生的马氏体 α' 相和残留的 β 相,可以获得较为稳定的室温组织^[10]。TC4合金的淬火处理是将合金加热到高于相变温度50~100℃,然后使用水或者油等冷却介质进行快冷的工艺过程^[11]。可以获得完全的马氏体 α' 相,提高TC4合金的硬度和耐磨性。

结合以上几种热处理方法,通过使用去应力退火(SRA)、固溶+时效(SSTA)、水淬+回火(WQT)和油淬+回火(OQT)4种热处理方式对接头进行热处理。探究不同的热处理方法对于接头显微组织、力学性能的影响。以寻求对于TC4 K-TIG焊接接头最合适的改善接头组织均匀性和性能的热处理方法。

1 试验材料与方法

试验选用加工尺寸为200 mm×100 mm×6 mm(长×宽×高)的TC4钛合金,主要元素成分及含量见表1。

试验所用的设备为SWS-1000型号深熔焊机。在进行对接焊接过程中,严格控制试板对接间隙为

0,同时钨极和试板之间的间距设为2 mm。试板正面、焊枪内部以及试板背面均采用高纯氩气(99.999%)作为保护气,气体流速均为20 L/min。杜金红等人^[12]研究发现,在热输入为850~1 300 J/mm时可形成稳定的小孔熔透,在1 118 J/mm的热输入下,可获得具有良好力学性能的接头,故采取的焊接参数见表2。

表1 TC4合金的化学成分(质量分数)

元素	Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
占比	6.12	4.1	0.16	0.015	0.02	0.001	0.115	其余

表2 K-TIG焊接试验中的焊接参数

焊接电流/A	焊接速度/(mm·min ⁻¹)	电压/V	热输入/(J·mm ⁻¹)
345	300	18	1 118

试验所用的热处理设备是SA2-2-17TP箱式气炉。热处理前需先将炉体抽至所需真空度 10^{-1} Pa,升温 and 降温速率最大为10 K/min,在热处理的过程中不断通入高纯氩气(99.999%)进行气氛保护。采用以下4种处理方式进行焊后热处理:

(1) 去应力退火:加热至540℃后保温4 h,然后空冷至室温。

(2) 固溶+时效:加热至950℃后保温1 h,然后以8℃/min的冷却速度随炉冷却到550℃保温4 h,最后随炉冷却至室温。

(3) 固溶+水淬+回火:加热至950℃后保温1 h,然后使用去离子水进行淬火,后在450℃回火2 h后随炉冷却至室温。

(4) 固溶+油淬+回火:加热至950℃后保温1 h,然后使用快速淬火油进行淬火,后在450℃回火2 h后随炉冷却至室温。

4组热处理方式的温度曲线如图1所示。

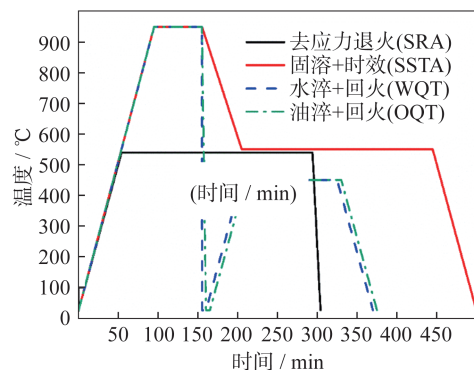


图1 不同热处理方式的温度曲线

2 试验结果

2.1 不同热处理方式对焊接接头宏观形貌的影响

图2(a)~2(d)分别为接头进行不同热处理后的宏观形貌,图2(e)为未经热处理的焊接态接头宏观形貌。如图2所示,SRA宏观形貌与焊接态基本一致,焊缝表面色泽均匀,HAZ与FZ的边界清晰,未

出现明显组织突变,原始晶粒形态未发生改变,宏观视角下可观察到焊接态典型的柱状晶分布特征。经SSTA处理后,接头整体宏观组织均匀性显著提升,HAZ与FZ的界限因受晶粒细化影响而趋于模糊。经WQT和OQT两者处理后宏观形貌呈现相似特征,HAZ和FZ区域的晶界宽度增大,形成“网格状”宏观组织轮廓。

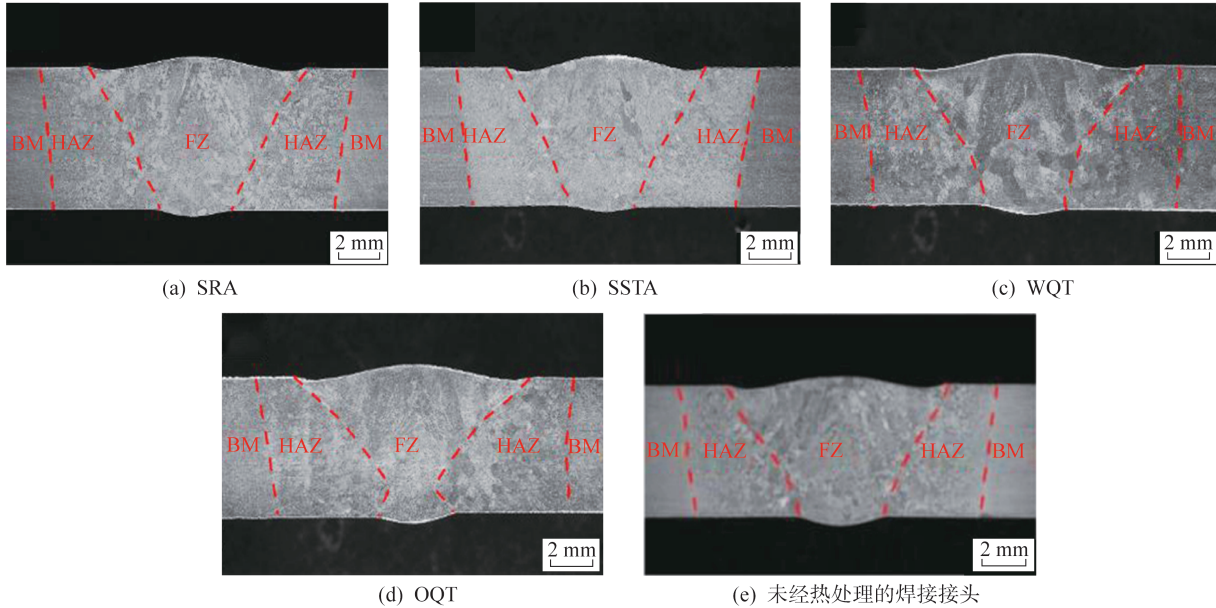


图 2 不同方式热处理后的焊接接头宏观形貌图

2.2 去应力退火(SRA)的显微组织

由图3(a)~3(f)可以观察到,TA1纯钛板材经过SRA处理后,HAZ的组织形态未发生明显改变,仍以不同尺寸如初晶 β 晶粒构成,内部析出的 α' 相与

原晶界呈 45° 析出。在FZ区域,初晶 β 的分布同样未发生明显改变,但内部析出的 α' 相在数量上有所减小。微小的 α_3' 相会部分溶解, α_1' 相和 α_2' 相的形态未发生明显改变。

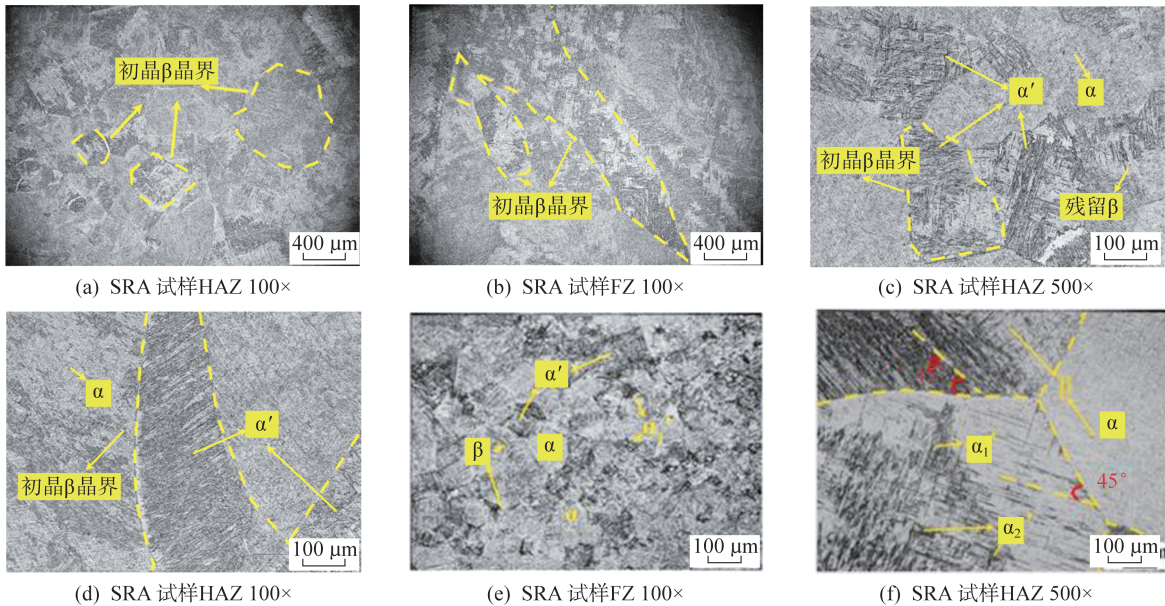


图 3 SRA 试样的光镜显微组织

2.3 固溶+时效处理(SSTA)的显微组织

结合图4、图3(e)~3(f)表征结果,可明确接头经SSTA热处理后,其全部接头区域的显微组织与焊接态的接头显微组织相比发生了明显变化。时效处理可以有效消除因焊接产生的马氏体 α' 相和残留的 β 相,获得较为稳定的室温组织。图4(a)和图4(d)为母材区域的显微组织,由此结果表明母材区中的 $\alpha+\beta$ 组织的含量显著下降,二次 α 相的含量提升。这是由于在经过950 °C固溶1 h后,母材内的 $\alpha+\beta$ 组织由

于Al的扩散导致残留 β 相发生溶解^[13]。

图4(b)和图4(e)为接头HAZ的组织,由此可知,原初晶 β 晶界处有晶界 α 相析出。由于固溶温度处于临近相变点附近,导致部分HAZ区域的 α' 相已经完全发生相变,首先生成初晶 β ,然后在后续时效过程中转化为一次 α 相,而大部分的 α' 相则会重新溶解固溶,在此过程中,其内部饱和固溶的Al元素会再次析出,然后按照原 α' 相晶界生成新片层状的二次 α 相,其余部分则会形成片层的二次 β 相。

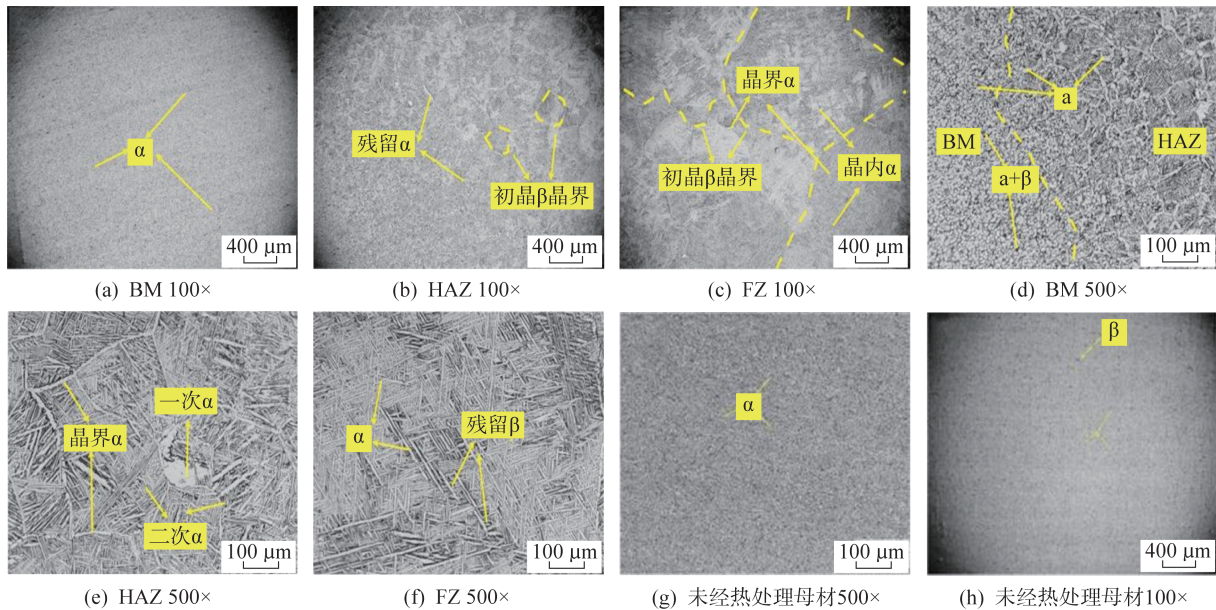


图4 SSTA试样的光镜显微组织

图4(c)和图4(f)为试样4的FZ经SSTA后的显微组织。由图可知,其发生的变化与HAZ类似,在原初晶 β 晶界处会析出晶界 α 相,宽度大小大于HAZ。在初晶 β 晶粒内部,全部的 α' 相会发生溶解,生成和原 α' 相取向相同的二次 α 相。在相距较近的二次 α 相之间,会有残留的 β 片层伴随二次 α 相的

析出依次出现。

2.4 水淬+回火处理(WQT)的显微组织

图5为经过WQT处理后接头的显微组织图,结合图3(e)~3(f)与图4(g)~4(h)分析得到经过WQT的试样组织相较于焊接态发生明显的转变,且不同区域间的组织也存在明显差异。

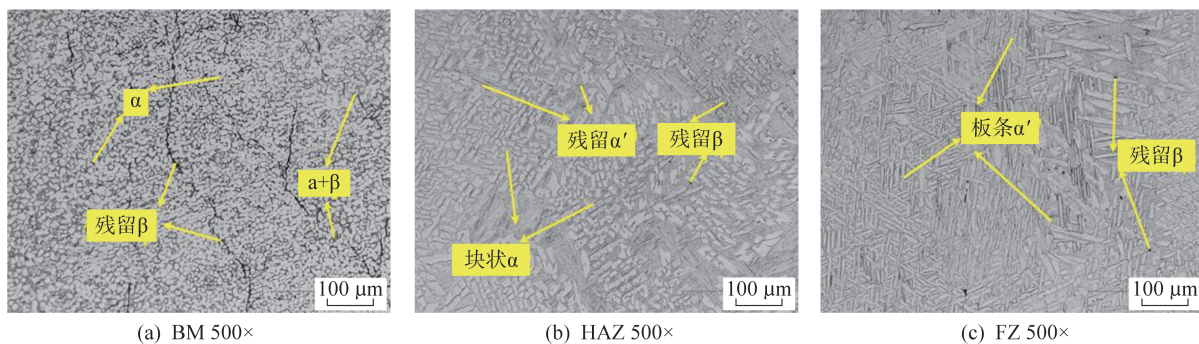


图5 WQT试样的光镜显微组织

图5(a)为经WQT热处理后母材区的显微组织,结果表明,母材区的等轴块状 α 相及带状 $\alpha+\beta$ 组织

完全消失,转变成块状基体 α 与 $\alpha+\beta$ 相。同时,部分区域经固溶处理后,形成了网状残留 β 相。图5(b)

为HAZ的显微组织,结果表明,该区域原针状 α' 相已转变为块状 α 相,仅局部残留少量 α' 和点状 β 相,且HAZ区域的组织呈现典型羽毛状特征。在后续的回火过程中,块状 α 相逐渐长大。图5(c)为FZ的组织,结果表明,焊接态针状 α' 相完全溶解。所有区域在淬火后形成了板条状的 α' 相,由于固溶处理的加热温度设为950 $^{\circ}\text{C}$,淬火时焊接态的针状 α' 相全部转变为初晶 β 相,然后经快速冷却转化为板条

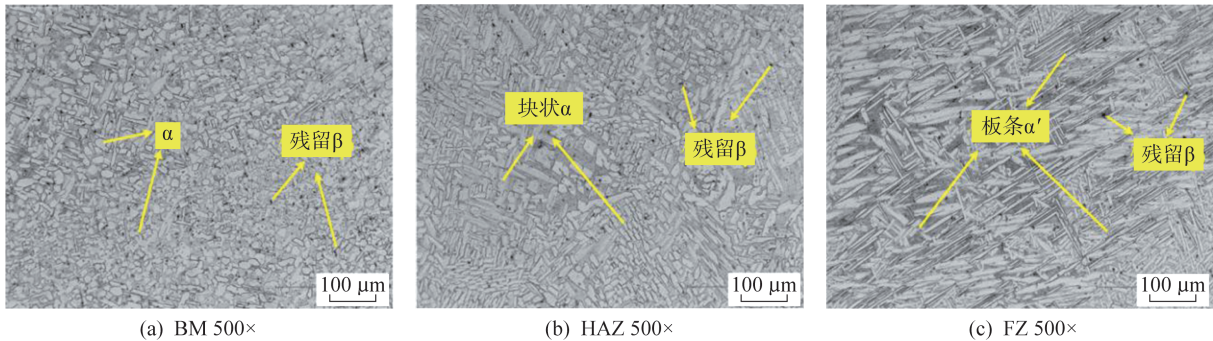


图6 OQT试样的光镜显微组织

经OQT处理后试样4母材区的显微组织如图6(a)所示。母材区原本的等轴块状 α 相和沿轧制方向分布的带状 $\alpha+\beta$ 组织完全消失,组织形态转变为 α 相,部分块状基体进一步生长成短棒状。由图6(a)可见,与WQT处理后的母材区相比,BM区残留 β 相数量减少,呈弥散分布的黑色点状。热影响区显微组织如图6(b)所示。由图可见,经OQT处理后生成块状和长条状混合的 α 相,在后续的回火过程中发生明显长大现象。且在该区域也有大量的残留 β 相,弥散分布在块状 α 相的界面交界处。熔合区如图6(c)所示。由图可见,FZ区域生成大量的板条状 α 相,其数量要少于WQT,但尺寸却比WQT区域的要大。

3 力学性能变化

3.1 显微硬度分析

经不同热处理后试样的显微硬度变化如图7所示。经过SRA处理后,接头的显微硬度均呈现提升趋势,接头不同区域间的均匀性显著提升,整体硬度为360 HV0.2左右。相较于SRA处理,经过SSTA、WQT和OQT处理后的试样显微硬度提升更为显著。经SSTA处理后接头硬度处于450~520 HV0.2,不同区域间的硬度有着显著差别。其中经WQT处理后试样的显微硬度最高,而经OQT处理后的试样则略微高于经WQT处理后的试样,

α 相。与焊接态的 α' 相相比,尺寸显著增大,数量明显增多。淬火后则进一步形成板条状 α' 相。回火处理使板条 α 相尺寸增大,元素分布更均匀。

2.5 油淬+回火处理(OQT)的显微组织

经OQT处理后的接头显微组织(如图6所示)与经WQT处理后的具有类似的相变过程,但在淬火过程中油淬的冷却速率要低于水淬,导致生成的块状 α 相具有更长的生长时间。

但两者都达到了480 HV0.2以上。

试样显微硬度的变化由其微观组织变化决定。经SRA处理后,固溶进入 α' 相的Al元素得到释放,扩散并固溶进入 α' 相周围的二次 α 相中,起到强化作用,所以试样能够显著提升整体的显微硬度且变得均匀。进行SSTA处理后,试样中的 α' 相几乎全部转变为 α 相, α 相对硬度的贡献显著高于针状的 α' 相,所以接头的显微硬度显著上升^[14]。经过WQT和OQT处理后的试样,其组织全部变为 α 相,进而导致显微硬度显著提升。

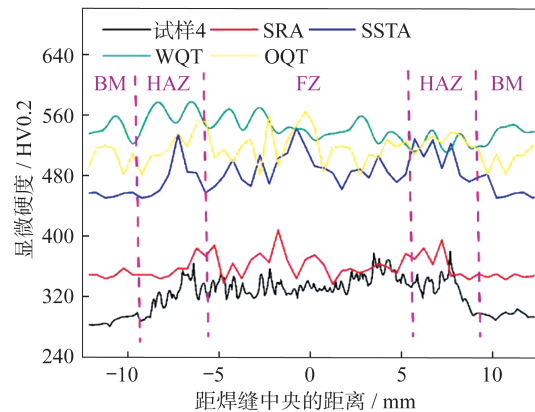


图7 不同热处理方式的显微硬度

进一步对比可知,经WQT与OQT处理后试样硬度与耐磨性能呈正相关,块状 α 相的强化作用使耐磨性能提高。由于WQT和OQT试样中的 α 相为块状和短棒状,其中WQT处理后的板条 α 相尺寸最

小,其显微硬度也最大。

3.2 不同热处理方式对焊接接头抗拉强度、屈服强度和断后伸长率的影响

图8为经过不同热处理后接头的应力-应变曲线。经热处理后,接头的强度均有所下降,而部分接头的断后伸长率有所提升。经SRA和SSTA处理的试样断裂发生在熔合线附近,经WQT和OQT处理的试样断裂却发生在母材靠近拉伸试样夹持部位。结果表明,经过WQT或OQT处理,焊接接头的均匀性显著提升,焊接造成的咬边不再是接头的薄弱部位。

热处理后和焊接态试样的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率如图9所示。结果显示所有试样的抗拉强度和屈服强度相较于焊接态试样都呈下降趋

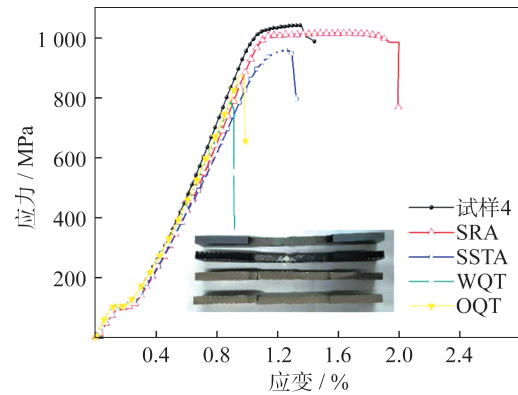


图8 不同方式热处理后试样应力应变曲线

势。经过SRA的试样断后伸长率相较于焊接态提高了10.11%。而SSTA、WQT和OQT试样的强度和断后伸长率对比焊接态试样都有所下降。

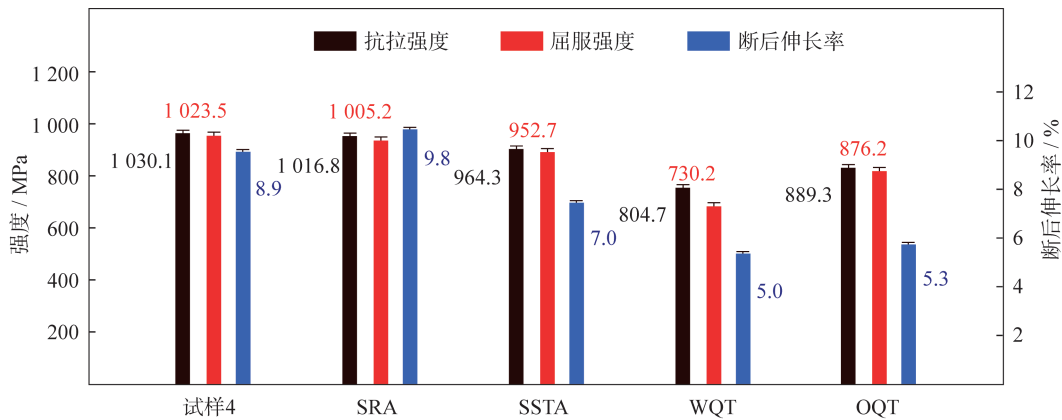


图9 不同方式热处理后试样的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率

SRA处理通过低温退火使HAZ和FZ区域内的 α_3' 相溶解,强化相的溶解和SRA处理后位错密度的减少导致接头的强度略有下降,但 α_1' 相和 α_2' 相的数量和形态并未发生变化,其强度下降幅度相对较小。由于 α_3' 相消失及 α' 相位错钉扎区均匀化减少的位错与亚晶界对材料变形的抵抗力,所以SRA试样的断后伸长率提升了10.11%。SSTA处理后,HAZ和FZ的 α' 相全部转换为二次 α 相和晶界 α 相,如图3所示,导致固溶强化消失及晶界弱化,引发强度显著下降。但由于HAZ和FZ内的 α 相的形态大部分为针状,尺寸较小,对接头能够起到较好的强化作用^[15]。WQT和OQT强度和断后伸长率均出现大幅度下降趋势,原因在于经淬火后,母材的等轴轧制态的细晶粒经相变转变为晶粒较大的块状 α 相,且网状和点状的残留 β 相会大量出现。这种相变导致的细晶强化消失和网状 β 相的缺陷致使强度和断后伸长率都发生下降。

3.3 拉伸断口分析

图10(a)为SRA断口的宏观形貌,结果显示断口由中央的韧窝区和边缘的颈缩区构成。图10(b)和图10(c)分别为中央区和边缘区的放大图,结果显示断口处由大量的韧窝和少部分的准解理面构成。经过SSTA后得到试样的断口形貌如图10(d)~图10(f)所示,可得经过处理后,试样的中央区域面积显著增大,颈缩区面积呈减小趋势。这表明在经过处理后,试样的抗变形能力减弱,变形的面积减小。在微观的断口形貌中可见大量的光滑解理面,这是脆性断裂时裂纹直接沿整个一次 α 相扩展所致。韧窝的数量减少,尺寸减小,接头整体的断裂形式变为脆性和韧性的混合断裂模式。

图11(a)~11(c)为WQT处理后试样的断口形貌表征结果,结果显示该试样断口整个截面基本呈单一区域。在断口的微观组织内部以台阶状的解理面为主要形貌特征,且遍布断口的全部区域。由于

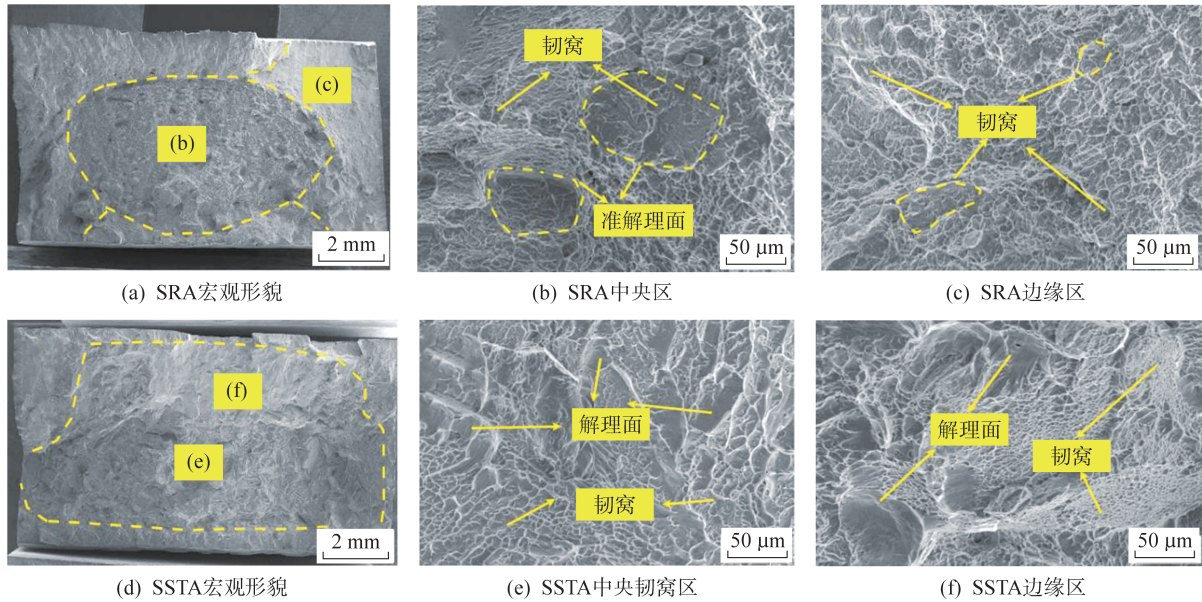


图 10 SRA、SSTA 试样拉伸断口的 SEM 照片

断裂发生于母材区,断口解理面内主要为块状的 α 相断裂后形成的块状滑移面。接头内部的残留 β 相会成为断裂时的裂纹源,而网状分布的 β 相进一步促使断口内解理面形成大块状台阶结构。同时在 2 个台阶界面处,可观察到因撕裂产生的孔洞区域。图 11(d)~11(f)为 OQT 试样的断口形貌,与 WQT 试

样类似,断口截面基本为单一区域。断口内部由大量长条状的台阶构成,且面积大于 WQT 试样,同时解理面内部的块状滑移面尺寸大于块状 WQT 试样。主要原因为 OQT 试样内部的块状 α 相尺寸增大,残留 β 相的数量减少,导致断裂时裂纹源减少 OQT 试样的强度和断后伸长率均要优于 WQT 试样。

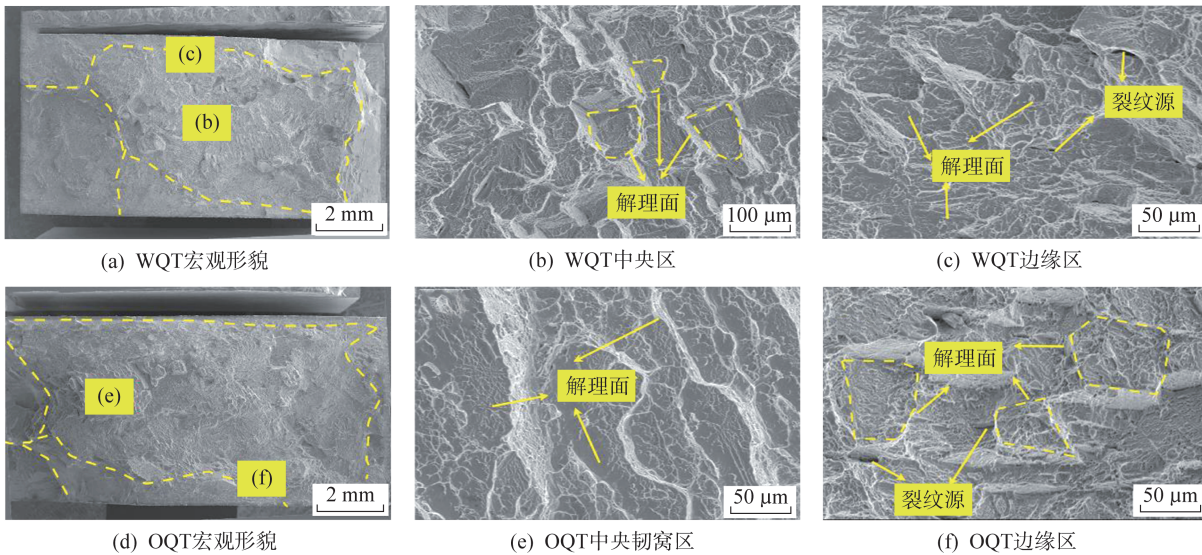


图 11 WQT、OQT 试样拉伸断口的 SEM 照片

4 结论

(1) 采用 4 种不同热处理后接头的显微组织均发生了显著变化。经过 SRA 处理后的 FZ 和 HAZ 中的 α_3' 相部分溶解,其余组织未发生明显变化。经 SSTA 后的 FZ 和 HAZ 全部重新析出晶界 α 相、一次 α 相和二次 α 相。WQT 和 OQT 处理后的 FZ 和 HAZ 析出块状和板条 α 相,OQT 在 FZ 上析出的板条状 α

相的数量要少于 WQT,但尺寸却大于 WQT 区域并有大量的残留 β 相出现在组织中。

(2) 经过 4 种热处理后试样的显微硬度都有所提升,其中 WQT、OQT、SSTA 提升较大,WQT、OQT 达到 500~600 HV0.2;SSTA 达到 450~530 HV0.2。

热处理后,试样的抗拉强度与屈服强度均有所下降,且 SRA 的断后伸长率在焊接态 96% 的基础上

还提升了10%。

参考文献

- [1] ZHAO Z, JI H, ZHONG Y, et al. Mechanical properties and fracture behavior of a TC4 titanium alloy sheet [J]. *Materials*, 2022, 15(23): 8589.
- [2] ZHAO Q, SUN Q, XIN S, et al. High-strength titanium alloys for aerospace engineering applications: A review on melting-forging process [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2022, 845: 143260.
- [3] LIU Z M, FANG Y X, CUI S L, et al. Stable keyhole welding process with K-TIG [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 238: 65-72.
- [4] 金和喜,魏克湘,李建明,等. 航空用钛合金研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(2): 280-292.
- [5] SHI Y, CUI Y, CUI S, et al. A Novel high-efficiency keyhole tungsten inert gas (k-tig) welding: principles and practices [J]. *Welding Technology*, 2021: 313-367.
- [6] PENG X, GUO H, SHI Z, et al. Microstructure characterization and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy after thermomechanical treatment [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(3): 682-689.
- [7] DING R, GUO Z X, WILSON A. Microstructural evolution of a Ti - 6Al - 4V alloy during thermomechanical processing [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 327: 233-245.
- [8] ZHANG C, ZHANG T, huang J. Effects of heat treatment on microstructure and microhardness of linear friction welded dissimilar Ti alloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(12): 3540-3544.
- [9] 王绍灼,孟晗,王芬,等. 改善低氧TC4-LC及重熔TC4钛合金性能的热处理工艺[J]. *金属热处理*, 2022, 47(4): 204-207.
- [10] 刘星星,严彪,唐人剑,等. TC6钛合金的淬火相变及时效研究[J]. *上海金属*, 2008(1): 12-14, 19.
- [11] 吴晨,马保飞,赵耕岑,等. 延时淬火对航天紧固件用TC4钛合金组织和性能的影响[J]. *金属热处理*, 2023, 48(12): 135-139.
- [12] DU J, LIU H, WANG F, et al. Effects of heat input on microstructure evolution, mechanical and corrosion properties of TC4 alloy by keyhole TIG welding [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 5266-5277.
- [13] XU K, XUE Y, ZHANG Z, et al. The effect of heat treatment on α/β phases evolution of TC4 titanium alloy fabricated by spark plasma sintering [J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 50: 713-718.
- [14] ZHOU Y, CHENG L, LI Y, et al. Interfacial microstructure evolution and mechanical properties in laser welded Invar alloy/TC4 dissimilar joints [J]. *Intermetallics*, 2024, 166: 108171.
- [15] DONG H, YU L, DENG D, et al. Effect of post-weld heat treatment on properties of friction welded joint between TC4 titanium alloy and 40Cr steel rods [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, 31(9): 962-968.