

薄壁 TC4 钛合金激光焊缝成型与性能调控研究进展

于航¹, 李军兆¹, 张望成¹, 孙清洁^{1,2}

(1. 湖南湘投金天新材料有限公司, 湖南 益阳 413057; 2. 哈尔滨工业大学(威海), 山东 威海 264209))

摘要: TC4 钛合金的焊接工艺及焊接性研究一直受到国内外的广泛关注, 主要综述了目前激光焊工艺对薄壁 TC4 钛合金焊缝几何形状、显微组织及力学性能影响的研究进展。简要分析了激光焊接工艺对焊缝几何形状及焊缝显微组织转变的规律, 并对焊缝几何形状和显微组织的转变机理进行了探讨。研究发现, 激光焊焊缝几何形状的变化主要原因在于焊接热输入的变化导致焊接过程中激光焊匙孔形状及模式发生了改变; 焊接热输入的增加会引起显微组织的转变, 焊缝金属中针状马氏体 α' 相是主要的强化相, 块状 α_m 和魏氏 α 相是主要的韧性相; 应对激光能量进行严格的控制, 以便在实际生产应用中提高焊接质量。

关键词: TC4; 激光焊接; 焊缝几何形状; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TF823, TG456.7

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)01-0053-14

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.01.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者
聊科研

Research progress of weld formation and performance control of thin plate TC4 titanium alloy by laser welding

Yu Hang¹, Li Junzhao¹, Zhang Wangcheng¹, Sun Qingjie^{1,2}

(1. Hunan Xiangtong Goldsky New Materials Co., Ltd., Yiyang 413057, Hunan, China; 2. Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, Shandong, China)

Abstract: The research on welding process and weldability of TC4 titanium alloy has been widely concerned at home and abroad. Therefore, this paper mainly reviewed the current research progress of the effect of laser welding process on the geometrical dimensions, microstructure and mechanical properties of thin plate TC4 alloy. The weld geometrical dimension and microstructure transformation as well as the related mechanism were analyzed and discussed. It is found that the change of weld geometrical dimension is mainly due to the variation of welding heat input, which leads to the change of laser welding keyhole shape and mode. The increase of welding heat input causes the transformation of the microstructure. The acicular martensite α' phase is the main strengthening phase, with the blocky α_m and Widmanstätten α phase as the main malleable phases. The laser energy should be strictly controlled to improve the welding quality in actual production applications.

Key words: TC4, laser welding, weld geometrical dimension, microstructure, mechanical properties

收稿日期: 2021-10-15

基金项目: 湖南省科技创新计划项目 (S2021 GXKJCX0287)。

作者简介: 于航(1995—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士生, 工程师, 研究方向: 激光焊接的应用, E-mail: 032@goldskycn.com。

0 引言

钛最先于1948年在航空发动机中得到应用,之后用于机身、导弹、卫星等,其中,TC4钛合金作为一种新兴材料具有良好的耐蚀性、高的比强度及较好的韧性和焊接性等优点,广泛应用于航空航天、建筑、石油化工等领域,是应用最为广泛的两相钛合金^[1-3]。

目前,在简化结构和减轻重量方面,焊接逐渐成为TC4钛合金加工的主要手段,且激光焊是TC4钛合金焊接的常见方法。激光焊接是一种特殊的熔焊方法,它利用高能量密度($10^6 \sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$)的聚焦激光束作为热源加热和熔化工件,基于激光与材料相互作用的光热效应形成的熔焊^[4-10]。与其他焊接方式相比激光焊具有焊接变形小、穿透性强、焊缝热影响区小、焊缝成形美观等特点,在TC4钛合金薄板及精密零件的焊接上具有广阔的应用前景^[11-16]。当前,国内外学者对TC4钛合金的激光焊接工艺研究较为全面,主要研究方式为改变焊接速度、激光功率、离焦量等参数以调整焊接热输入,对焊接接头组织进行优化,最终改善焊接接头力学性能,也有少部分学者通过改变激光入射角度、扫描路径、激光频率等方式研究其对焊接接头组织及力学性能的影响^[17-26]。此外,形状复杂的部件和复杂的焊接环境也会对焊接接头的焊缝形状、孔隙率和强度产生影响^[27-35],但是,相关方面研究相对较少。

因此,笔者主要综述了不同激光焊接工艺参数对TC4钛合金板材激光焊焊缝几何形状、显微组织及力学性能的影响,为TC4钛合金激光焊焊接工艺制定提供一定的理论依据和技术参考,以便在实际生产应用中提高焊接质量。

1 激光焊接参数对TC4合金焊缝几何形状的影响

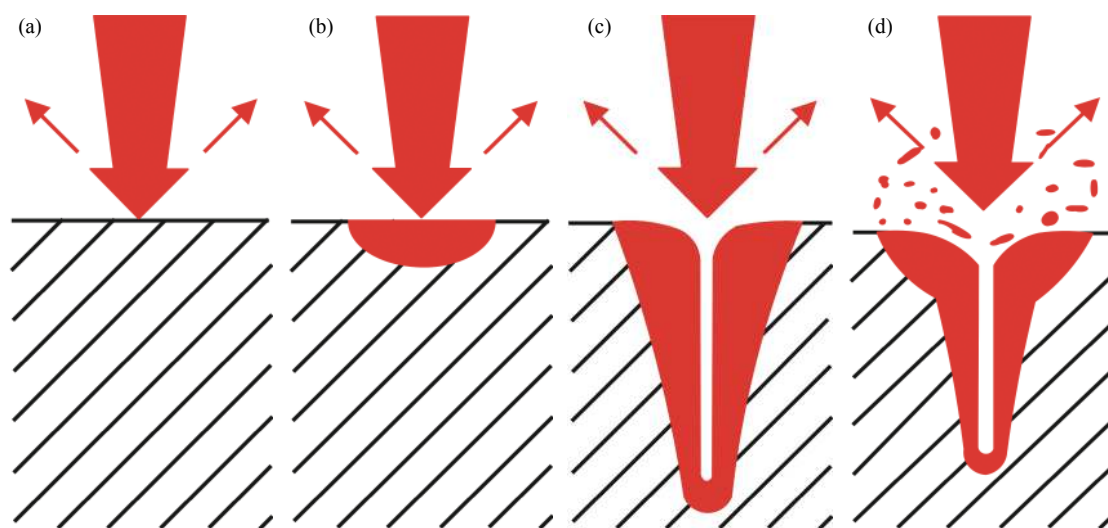
激光作用于材料表面所产生的物理现象包括表面温度升高、熔化、匙孔的形成以及激光诱导等离子体的产生,如图1所示^[36]。这些物理现象决定了焊接过程的热作用机理,从而出现了热传导焊接和深熔焊接两种不同的焊接模式,对于某些特定材料,有特定的功率密度阈值,当激光作用在材料上的功率密度低于该阈值时,激光能量被材料表面吸收并迅速转移到材料内部,形成宽且深的热传导焊缝;当激光作用在材料上的功率密度高于该阈值时,在工

件表面将热量传递到材料内部之前,激光能量使材料表面迅速升温、熔化和蒸发,并随着连续输入激光能量,形成厚度方向的匙孔,匙孔沿焊接方向移动,其后面的熔池迅速冷却凝固,形成宽度和深度较大的深熔焊缝^[36-39]。大量研究表明TC4钛合金激光焊接过程中,焊缝区的几何形状和热影响区的宽度均会随着激光焊接功率、焊接速度、热输入等参数的变化而变化^[38,40-44]。低热输入情况下,板材未被匙孔穿透,熔池形成闭合匙孔模式,激光束仅通过封闭匙孔的顶部开口反射出去,进而形成Y形焊缝;高热输入情况下,板材完全被匙孔穿透,熔池形成开放式匙孔模式,反射的激光束从钥匙孔的底部和顶部逸出,进而形成X形焊缝或H形焊缝,不同匙孔模式下形成的焊缝几何形状如图2所示^[36-38,41,45-46]。此外,也有学者将Y形焊缝称之为漏斗形焊缝和V形焊缝,目前,不同学者对焊缝几何形状的定义尚无统一标准^[46-47]。

姜毅等人^[8]研究发现,随着TC4钛合金焊接过程中激光功率的增大,焊缝上熔宽和下熔宽均增大且上熔宽和下熔宽尺寸差异减小。当激光功率为1600W、焊接速度为1.4m/min、离焦量为1mm时,焊缝上熔宽和下熔宽分别为2.5、2.1mm时,1.2mmTC4钛合金完全焊透。Hong和Shin^[40]通过多物理相预测模型对不同激光功率和焊接速度下1.62mm厚TC4钛合金激光匙孔焊接过程进行了数值模拟,指出激光功率在800~1000W和焊接速度在1.73~4m/min时,具有较好的焊接效果。在较高的焊接速度和较低的激光功率下,由于匙孔无法产生深空腔,焊缝熔深逐渐降低。杨东旭^[48]在3mmTC4钛合金激光焊接接头溶质元素分布及不均匀性研究中指出,焊接速度为3m/min、离焦量为0mm情况下,随着激光功率从1000W增加至3000W时,焊缝熔深、熔宽、余高均逐渐增加,且熔深的变化程度要大于熔宽的变化程度;激光功率为2500W、离焦量为0mm情况下,随着焊接速度从2.0m/min增加至4.5m/min时,熔深、熔宽和余高均逐渐减小,焊缝边缘与母材过渡越来越不平滑,焊缝成形逐渐不稳定。焊接速度过快或过慢都不能形成良好的焊缝。李明军等人^[12]研究了不同焊接速度下3mmTC4钛合金激光焊接接头成形及组织的影响,指出焊接功率2300W、离焦量为0mm、焊接速度为2.1~3.9m/min时,焊缝几何形状为X形焊缝。随着焊接速度的提高,热输入减小,熔池向

周边的铺展能力降低, 凝固速度提高, 导致焊接速度的提高将使焊缝上部和焊缝下部的半圆形区域减小,

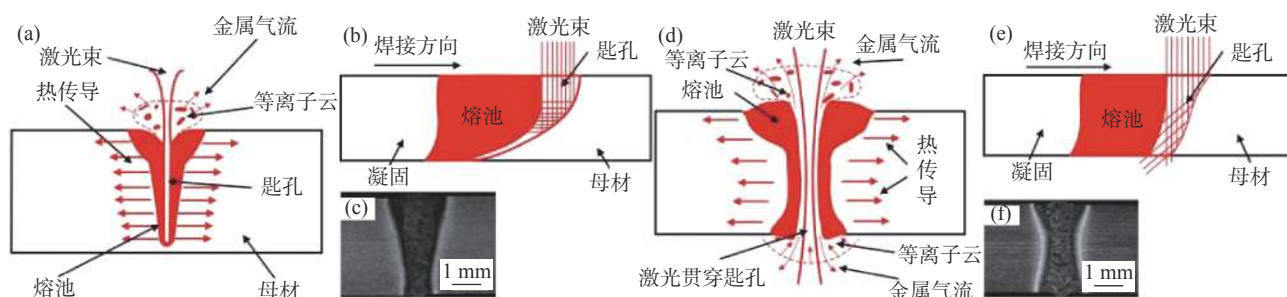
焊接速度对焊缝成型的影响如图 3(a)所示。



(a) 固态加热; (b) 表面熔化; (c) 匙孔效应; (d) 等离子体屏蔽

图 1 不同强度激光作用于金属表面的物理过程^[36]

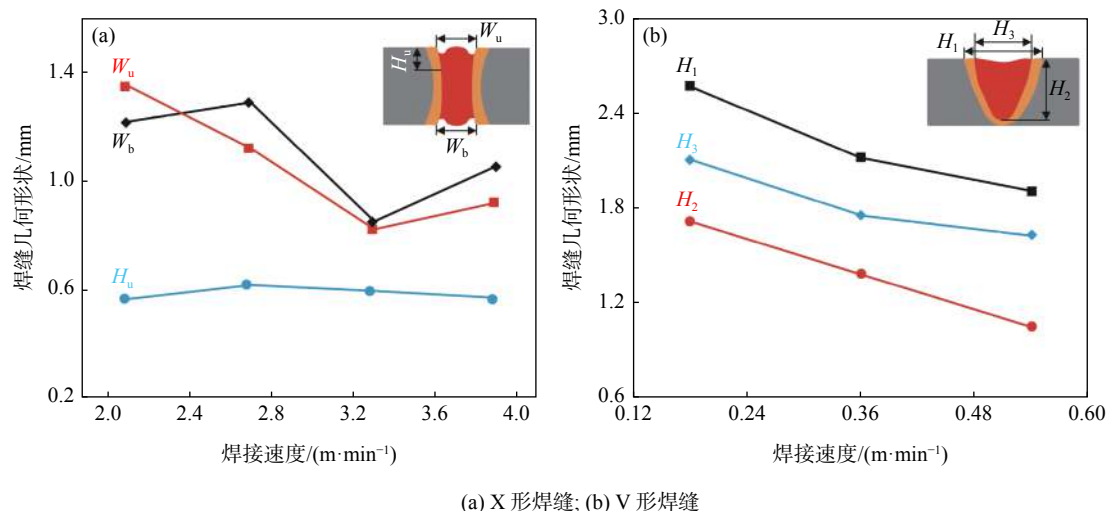
Fig. 1 Physical processes of laser of different intensities acting on metal surface



(a) 和 (b) 闭合匙孔模式; (c) 闭合匙孔焊缝形貌; (d) 和 (e) 开放匙孔模式; (f) 开放匙孔焊缝形貌

图 2 匙孔穿透模式及焊缝形貌示意^[41, 46-47]

Fig. 2 Schematic diagram of keyhole penetration mode and weld morphology



(a) X 形焊缝; (b) V 形焊缝

图 3 焊接速度对焊缝几何形状的影响^[12, 42]

Fig. 3 The influence of welding speed on weld geometrical dimension

Akbari 等人^[42,49]也指出 3 mm TC4 合金脉冲激光焊接过程中,焊缝熔宽和熔深会随着焊接速度的增加而减小,如图 3(b)所示。Akman 等人^[50]研究了激光脉冲能量、持续时间和峰值功率对 3 mm TC4 激光焊接头显微组织及力学性能的影响,指出可以通过精确控制激光输出参数来控制激光焊缝几何形状,峰值功率是影响熔深最重要的参数,但是,峰值功率过高会导致焊缝温度超过 TC4 合金的蒸发点,促使焊缝表面缩孔的形成,脉冲时间的增加会促进焊缝区和热影响区宽度的增加。在脉冲持续时间为 5 ms、光斑直径为 0.65 mm 情况下,激光峰值功率从 1 120 W 增加至 2 680 W 时,焊缝熔深逐渐增加。与低峰值功率相比,在较高峰值功率条件下的热影响区宽度和熔池宽度之比更大,并且由于激光脉冲与焊缝的相互作用时间更长,促使焊缝形成更宽的熔池和热影响区,当峰值功率 3 000 W、脉冲持续时间 10 ms 时,焊缝具有最深的熔池深度 2.97 mm,激光脉冲峰值功率对焊缝几何参数的影响如图 4(a)所示。Gao 等人^[24]研究了重叠因子对脉冲 Nd: YAG 激光焊接 TC4 薄板焊缝显微组织和力学性能影响,指出焊缝区的宽度会随着重叠因子

值的增加而增加,且焊缝区底部宽度与顶部宽度的比值随着重叠因子值的增加而增加。当重叠因子值为 0% 时,焊缝区的底部宽度与顶部宽度之比约为 0.38,焊缝区的顶部比底部宽;当重叠因子值为 76.8% 时,焊缝区的底部宽度与顶部宽度之比约为 1.0,焊缝区的顶部宽度等于底部宽度。激光焊接过程中,匙孔形状会受到熔池形状的影响,熔池中间宽度较窄时,不利于焊接接头底部激光束能量积累;当熔池中间宽度增大时,焊接接头底部可吸收更多激光束能量。因此,当重叠因子值增加时,顶部和底部之间的焊缝宽度差异减小,不同重叠系数下焊缝区底部与顶部的宽度比值如图 4(b)所示。Li 等人^[43]研究了 TC4 合金异种厚度激光焊接参数对焊接温度场和熔池尺寸的影响,指出焊接速度增加时,激光束投射到焊缝的持续时间更短,导致熔池及其附近的温度降低,促使熔池深度和宽度、热影响区宽度均减小,如表 1 所示。此外,板材厚度对焊缝偏差的影响最大,薄板上较低的冷却速率促使其产生较高的温度梯度,从而导致激光束吸收显著增加并且熔池向薄板偏移。

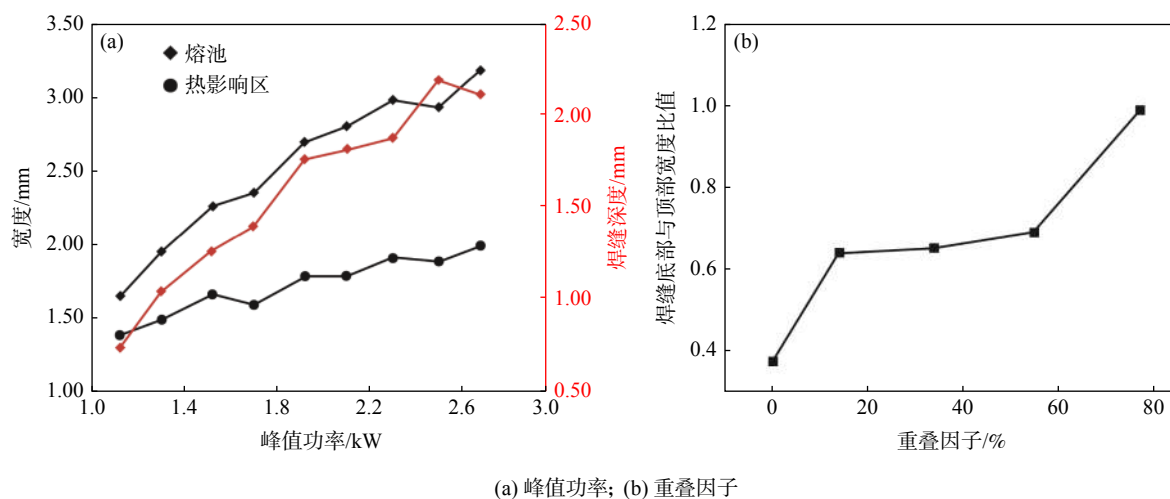


图 4 激光脉冲工艺参数对焊缝几何形状的影响^[24,50]

Fig. 4 The influence of laser pulse process parameters on weld geometrical dimension

表 1 不同焊接速度下熔池几何形状的比较^[43]

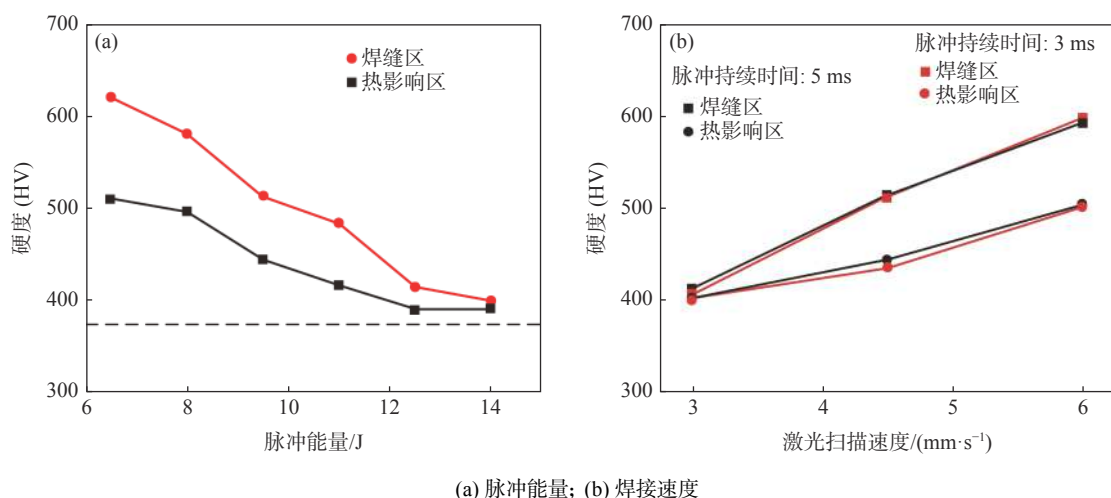
Table 1 Comparison of the geometry of the molten pool for various welding speeds

编号	焊接速度/(m·min ⁻¹)	焊缝宽度/mm	焊缝深度/mm	热影响区宽度(板厚=1 mm)/mm	热影响区厚度(板厚=1.5 mm)/mm
1	2	1.51	完全焊透	0.86	0.79
2	4.3	1.26	完全焊透	0.74	0.7
3	6.2	0.93	0.89	0.59	0.48

综上可知,随着激光焊接过程中焊接速度的升高、激光功率的降低,导致焊缝处加热时间较短,不足以产生足够的焊缝熔深;在较低的焊接速度下,入射激光束和母材之间的相互作用时间较长,更多的热能传递到匙孔壁,这种热能的存在产生了更深的匙孔,进而形成较深的焊缝;如果传递的能量过高,则熔池表面会出现材料的汽化和损失,并形成烧蚀^[11, 12, 51]。激光焊接过程中,可通过改变离焦量的大小,促使焊缝处产生不同的能量密度,进而获得适当的焊缝形貌,也可通过考虑熔池周围的温度变化和热循环过程来模拟、预测焊缝几何形状(宽度和深度)的变化。此外,激光大角度斜向焊接存在明显的激光反射作用,需要降低焊接速度和提高激光功率以控制良好的焊缝成形。薄壁钛合金的低速激光焊工艺窗口较窄,需要对激光能量进行严格的控制,通过控制焊缝温度和激光工艺参数等,可以精确控制焊接过程^[15, 24, 43]。

2 激光焊接参数对 TC4 钛合金焊缝金属显微组织及力学性能的影响

激光焊接与传统焊接模式相比,焊缝具有残余变形小、组织细小、热影响区窄、强度高等优势,更适合于焊接 TC4 钛合金^[41, 52-53]。 β 相的快速凝固转变是 TC4 钛合金激光焊接过程中的典型现象,其中,TC4 钛合金焊接接头中针状马氏体 α' 相、魏氏 α 相和块状 α 相的组织占比与焊接接头的冷却速度存在一定关系^[53-58]。Baruah 和 Bag^[59] 对 0.5 mm TC4 合金板 Nd: YAG 激光焊接接头的工艺参数(即脉冲能量、脉冲宽度和焊接速度)进行研究,指出板材变形会随着热量输入的增加而增大,且由于细小的 α' 马氏体的存在,导致焊缝区的硬度非常高。但是,无论脉冲能量和焊接速度如何,焊缝区的平均硬度均高于热影响区,焊缝区和热影响区的硬度均大于母材,并且显微硬度随着脉冲能量的增加和焊接速度的降低而降低,如图 5 所示。



(a) 脉冲能量; (b) 焊接速度

图 5 硬度分布变化^[59]

Fig. 5 Variation of hardness distribution

杨静等人^[60-61]指出 0.8 mm TC4 钛合金激光焊最佳离焦量为 -0.5 mm。焊缝区为粗大 β 柱状晶,柱状晶内部主要为针状马氏体 α' 组成的网篮组织;热影响区由原 α 和针状马氏体 α' 组成,但马氏体 α' 数量相对较少。随着焊热输入量的增加,马氏体的形态由单相平行单向生长转变为多向生长,且分布更加密集和散乱,但焊接工艺参数的改变对相组成基本没有影响,各相的相对含量随焊接线能量的变化也不显著。不同焊接工艺参数下接头的强度均高于母材,但塑性低于母材,如表 2 所示。Hong 和

Shin^[40] 对不同激光功率和焊接速度下 1.62 mm TC4 钛合金激光匙孔焊接过程研究中指出,在焊缝冷却过程中,焊缝区和热影响区在冷却过程中经历了马氏体 α' 相和相变 α 相的转变,并且焊缝区和热影响区中形成的马氏体数量受冷却速度的影响,无论焊接工艺参数如何,热影响区的冷却速率始终较低,焊缝区硬度均大于热影响区。但是,焊缝区与热影响区边界处存在更高含量的针状马氏体 α' ,焊接接头硬度峰值会在焊缝区和热影响区边界处出现。赵晓龙等人^[62]指出当激光功率为 2000 ~ 3 500 W、

焊接速度为 1.5 ~ 8.0 m/min、离焦量为 -1.5 ~ 1.5 mm 时, 2 mm TC4 钛合金均可获得表面和内部无气孔等缺陷的高质量焊缝。激光焊接头抗拉强度为 1 095 ~ 1 106 MPa, 屈服强度为 1 054 ~ 1 066 MPa, 均大于母材; 激光焊缝断后伸长率为 10.1% ~ 11.1%, 低于母材。Campanelli 等人^[63]研究了不同焊接速度对 2 mm TC4 钛合金激光焊接接头显微组织及力学性能影响, 指出焊接速度的增加会导致热影响区和焊缝区尺寸的减小, 焊缝金属显微组织由较大的晶粒组成, 原 β 相晶粒内部为不同取向的 α' 马氏体

组成, 焊缝抗拉强度低于母材且断后伸长率明显降低, 不同焊接速度下焊缝力学性能变化如图 6 所示。李仲树和周金宇^[64]在研究 2.1 mm TC4 钛合金激光焊缝微观组织和性能中指出, 焊缝区为网篮状 α' 针状马氏体, 热影响区存在少量 α' 马氏体。焊缝区显微硬度高于热影响区, 热影响区显微硬度高于母材, 焊缝区和热影响区显微硬度随着焊接功率的增加而增加, 但是, 焊接功率对焊接接头的抗拉强度和伸长率影响不大, 如表 2 所示。

表 2 焊接接头拉伸力学性能^[60, 64, 11]
Table 2 Tensile mechanical properties of welded joints

编号	激光功率/W	焊接速度/(m·min ⁻¹)	抗拉强度/MPa	延伸率/%	断裂位置	参考文献
1	1 100	2.0	1 029	7.3	母材	[60]
2	1 100	3.0	1 007	6.5	母材	
5	1 200	2.0	1 011	7.3	母材	
4	1 300	3.0	1 066	8.4	母材	
5	1 350	1.2	1 126	10.0	母材	[64]
6	1 450	1.2	1 178	7.7	母材	
7	1 550	1.2	1 168	6.7	母材	
8	4 000	3.0	979	10.2	母材	[11]
9	4 500	3.0	964	11.5	母材	
10	4 000	3.5	967	9.3	母材	

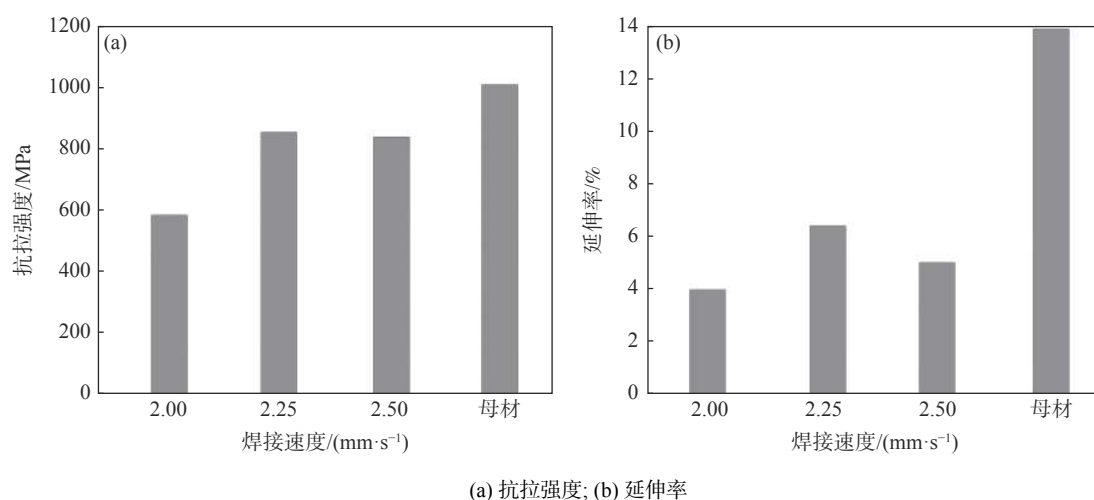


图 6 不同焊接速度下焊缝金属力学性能^[63]

Fig. 6 Mechanical properties of weld metal with different welding speeds

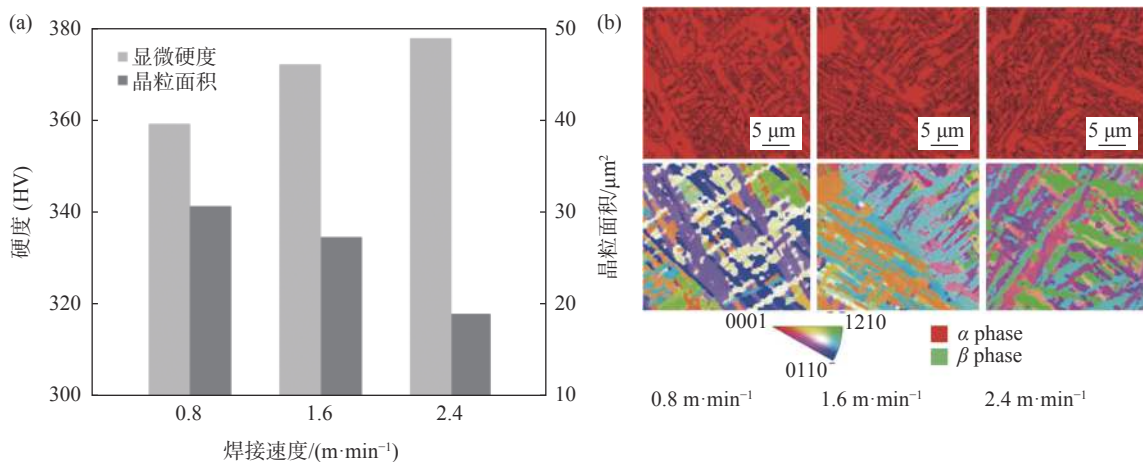
Aravind 等人^[65]采用 VIKOR 优化方法对 3 mm TC4 激光焊接参数进行了研究, 指出优化后的焊接参数为: 焊接功率 1 600 W, 焊接速度 0.3 m/min, 保护气体流量 20 L/min; 采用 CO₂ 激光焊接工艺具有

更高的功率密度, 焊缝具有锁孔形状, 焊缝熔深为 3.55 mm, 焊缝宽度为 3.06 mm; 焊缝区组织主要为 α' 马氏体, 焊缝区硬度 (HV) 为 810, 热影响区硬度 (HV) 为 541。黄伟等人^[11]研究了激光功率对 3.5 mm

TC4 合金焊接接头显微组织及力学性能的影响(见表 2 所示), 指出激光功率 4 000 W、焊接速度 3.0 m/min 时, 焊接接头抗拉强度与母材接近。当激光功率从 3 500 W 增加至 4 500 W 时, 不同激光功率下热影响区显微组织由初生 α 相和少量 α' 马氏体组成, 焊缝区显微组织主要为针状 α' 马氏体和少量的 β 相, 焊缝区的显微硬度最高, 热影响区的显微硬度次之, 母材的显微硬度最低, 焊接接头各区显微硬度分布变化基本相同。

徐甄真等人^[10]研究了不同焊接速度下 4 mm TC4 合金激光焊接接头显微硬度、显微组织和晶粒取向的关系, 指出母材的显微组织由白色等轴 α 相和晶间 β 相组成; 焊缝区显微组织主要为原 β 晶界隔开的针状马氏体; 完全转变热影响区主要为针状马氏体和块状相变 α ; 部分转变热影响区为针状马氏体、块状转变 α 、原 α 相和 β 相。在焊缝金属的冷却过程中, 初生马氏体成核并长大至晶界处, 垂直于初生马氏体上生长的次生马氏体在遇到晶界或初

生马氏体时停止生长。从焊缝金属到母材, 马氏体减少, 原 α 相和 β 相增加, 相变 α 先增加后减少。在较宽的焊缝中或在不同焊速接头的焊缝中心, 显微硬度随着冷却速率、马氏体大小和马氏体的晶界取向差而变化, 熔合线上显微硬度最高。随着焊接速度的增加, 焊接接头的最高显微硬度和显微硬度在焊缝深度和横向上的不均匀程度都增加, 但焊缝较窄时, 冷却速率等引起的显微硬度差异较小。焊接速度对焊缝显微组织和硬度的影响如图 7 所示。Köse 和 Karaca^[51]研究了不同热输入对 4 mm TC4 合金光纤激光焊接接头组织和力学性能的影响, 指出低热输入条件下焊缝区显微组织由晶内针状马氏体 α' 和晶界原 β 相组成; 高热输入条件下焊缝区显微组织发生粗化, 魏氏 α 相结构增加。低热输入条件下焊接接头抗拉强度和屈服强度均优于高热输入条件下焊接接头, 此外, 焊缝区和热影响区的硬度均高于母材, 焊缝区硬度最高, 增加激光功率或降低焊接速度(增加热输入)都会导致硬度降低, 如图 8 所示。



(a) 马氏体晶粒面积和显微硬度; (b) 晶粒取向和晶界

图 7 焊接速度对焊缝金属显微组织和硬度的影响^[10]

Fig. 7 The effect of welding speed on the microstructure and hardness of the weld metal^[10]

许爱平等人^[13]研究了 5 mm TC4 钛合金激光焊接最优工艺参数, 指出激光功率 2 900 W、焊接速度 3.6 m/min 时, 焊缝中心为粗大的 β 柱状晶且晶界清晰可见, β 柱状晶内部为纵横交错的针状 α' 马氏体; 热影响区主要为 $\alpha+\beta+\alpha'$, 热影响区中 α' 马氏体含量少于焊缝中 α' 马氏体含量。Xu 等人^[66]研究了焊接速度对 6 mm TC4 合金激光焊焊缝区的显微组织, 指出焊缝区组织转变受焊接速度影响, 马氏体 α' 是焊缝区主要组织。当焊接速度为 1.4 m/min 时, 焊缝区主要组织为马氏体 α' 相和少量相变 α 相;

当焊接速度为 1.6 ~ 2.0 m/min 时, 焊缝区主要组织为马氏体 α' 相和少量残留 β 相。Liu 等人^[67]研究了激光焊接工艺对 5.1 mm TC4 合金焊缝显微组织和力学性能影响, 指出激光焊焊缝显微组织及力学性能受焊接参数影响会发生明显变化。当激光功率为 10 000 W、焊接速度为 2 ~ 6 m/min 时, 焊缝全熔透; 当激光功率为 10 000 W、焊接速度为 8 m/min 时, 焊缝部分熔透。部分转变热影响区由原始 α 相、原始 β 相、相变 α 相、马氏体 α' 相和残余 β 相组成; 完全转变热影响区和焊缝区由相变 α 相、马氏体 α' 相

和残余 β 相组成。随着焊接速度的增加,相变 α' 相消失,完全转变热影响区和焊缝区主要为马氏体 α' 组织,此外,随着焊接速度的增加,焊缝区中马氏体 α' 逐渐细化。焊缝区在10 000 W和2 m/min焊接参数下平均硬度(HV)约为357,焊缝硬度随着焊接速度的增加逐渐增加至最高值402,不同焊接速度下焊缝区晶粒宽度及显微硬度,如图9所示。

综上可知,在激光焊接过程中,从熔池到母材,由于温度梯度和时间差异等因素,焊缝金属会产生不均匀的微观组织结构^[68-70]。TC4合金的冷却速率超过410 °C/s才能获得完全的马氏体 α' 相,较低的冷却速率下TC4合金的显微组织为马氏体 α' 相、块状 α_m 相和扩散形成的魏氏 α 相混合微观结构^[17, 53], TC4钛合金固溶体连续冷却转变,如图10(a)所示。

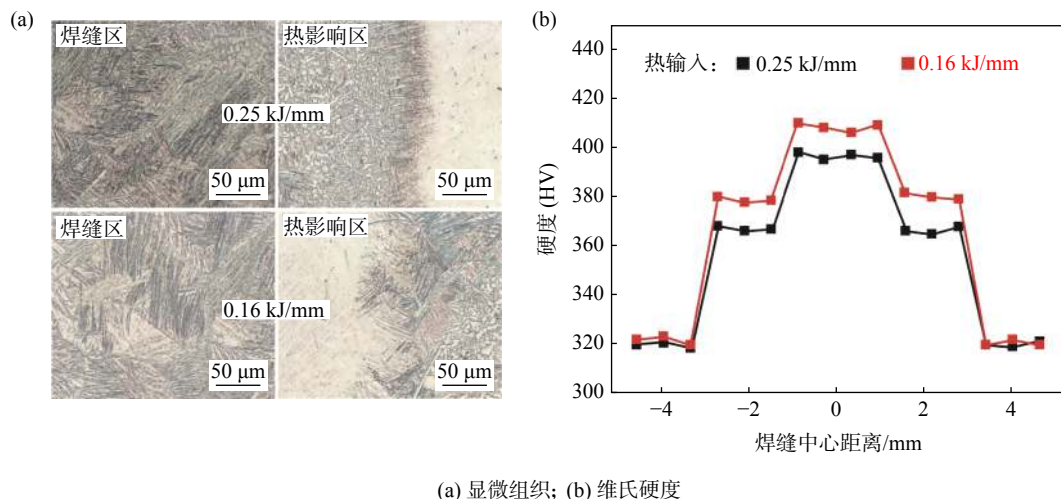


图8 不同热输入下焊接接头显微组织及维氏硬度变化^[51]

Fig. 8 Microstructure and Vickers hardness changes of welded joints under different heat input^[51]

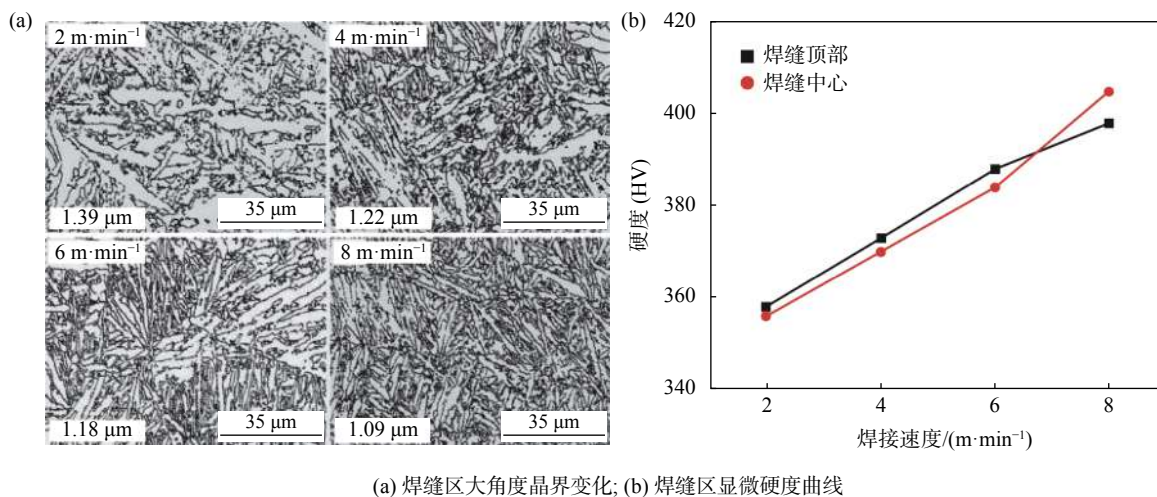


图9 不同焊接速度下焊缝区晶粒宽度及显微硬度^[67]

Fig. 9 Grain width and microhardness of weld zone at different welding speeds^[67]

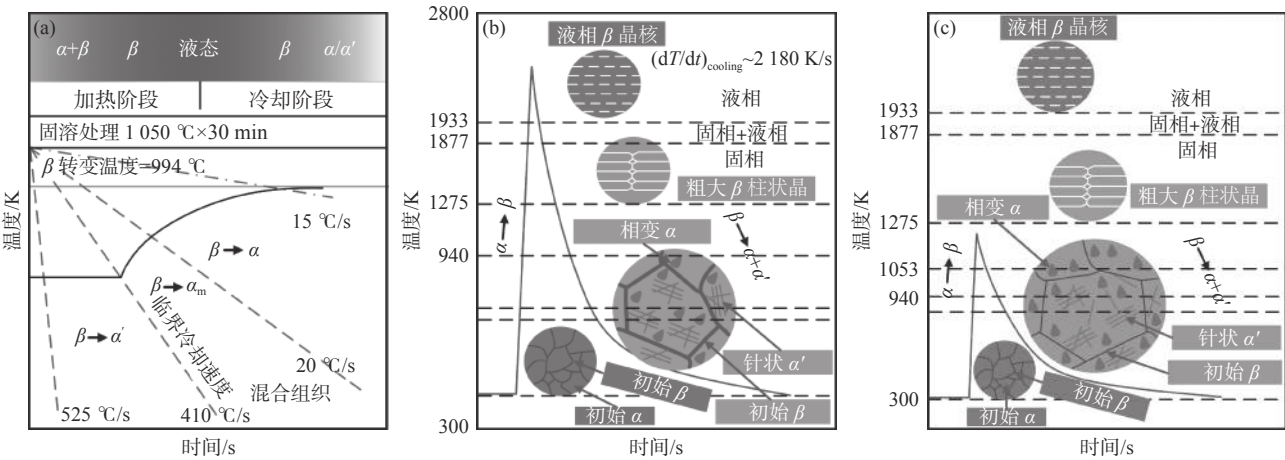
焊缝区显微组织常见为无扩散转变形成的针状马氏体 α' 以及扩散转变形成的块状 α_m 相和魏氏 α 相等组织,焊缝区组织转变如图10(b)所示。焊缝区网篮状的针状马氏体是提高焊缝强度和硬度的主要组织,不同形貌的网篮状组织对焊缝金属强度的提高程度存在一定差别,网篮组织大致可分为三种形貌:①网篮组织由单向生长的针状马氏体组成,其间存在不同取向的细小针状马氏体;②网篮组织由

互相垂直针状马氏体组成;③网篮组织内部针状马氏体存在多种取向且交错生长^[68-70]。此外,焊缝区晶界处缺陷的存在也会对针状马氏体的形成起到促进作用^[2, 68-71]。当焊接热输入较小、高温时间较短时,焊缝区的冷却速度较大,马氏体多以细小、单一取向生长,对焊缝金属的强化效果较好;当焊接热输入较大、高温时间较长时,焊缝区温度较高且冷却速度较小,导致针状马氏体粗大且存在多取向生长

结构, 对焊缝金属的强化效果减弱。

热影响区主要呈带状分布且组织常见为原 α 相、原 β 相、块状 α_m 相、细小针状马氏体 α' 相组成的混合组织, 与焊缝区相比其晶粒较为细小^[2, 17, 72-73], 热影响区组织转变如图 10(c) 所示。热影响区原 α 晶粒和针状马氏体的大小和比例沿从母材到焊缝区方向不断变化, 母材侧的热影响区主要由块状 α_m 相、原 α 相和原 β 相以及少量 α' 相组成, 焊缝区侧的热影响区主要由针状马氏体 α' 相和块状 α_m 相组成, 热影响区冷却过程中产生的针状马氏体占比从母材到

焊缝区方向存在不断增大的趋势^[2, 17]。焊接过程中温度较焊缝区低, 原 α 相和 β 相存在不完全转变且高温时间较短, 高温 β 晶粒仅有轻微的长大, 生成的针状马氏体组织较为细小。焊接峰值温度和升温速度增加后, 原 α 晶粒逐渐长大, 后被先转变的原 β 晶粒不断吞并形成尺寸较大的高温 β 相, 冷却过程中将会形成尺寸较大的针状马氏体, 焊接工艺对热影响区组织转变及力学性能的影响具有一定的相似性^[72-73]。表 3 为不同厚度下 TC4 钛合金激光焊接可供参考工艺。



(a) TC4 β 1050 °C 固溶处理连续冷却转变; (b) 焊缝区热循环和相转变; (c) 热影响区的热循环和相转变

图 10 TC4 钛合金组织转变示意^[17, 53]

Fig. 10 Schematic diagram of TC4 titanium alloy microstructure transformation

表 3 不同厚度下 TC4 钛合金的激光焊接工艺参数

Table 3 Laser welding process parameters of TC4 titanium alloy with different thicknesses

编号	厚度/mm	学者	年份	焊接参数				参考文献
				激光功率/W	焊接速度/(m·min ⁻¹)	离焦量/mm	焊接保护气	
1	0.5	杨烁等人	2019	430	1.5	3	Ar	[15]
2	0.8	杨静等人	2007	1 300	3	0.5		[60]
3	1.2	张颖云等人	2019	1 200	1.5	3	Ar	[70]
4	1.2	姜毅等人	2020	1 200	1.4	1	Ar	[8]
5	2.0	徐洁洁	2009	2 500	6		He	[54]
6	2.0	Campanelli .et al	2015	1 200	2.25		Ar+He	[63]
7	2.1	李仲树等人	2017	1 550	1.5	0	Ar	[64]
8	3.0	张启良	2014	2 300	0.4	0	Ar	[1]
9	3.0	李明军等人	2017	2 300	3.3	0	Ar	[12]
10	3.0	李海刚等人	2017	2 100	1.2	0	Ar	[14]
11	3.5	黄炜等人	2019	4 000	3	0	Ar	[11]
12	4.0	Köse .et al	2017	1 500	0.36		He	[51]
13	4.0	陈波等人	2021	4 000	1.2	0		[16]

3 激光焊接接头的焊后热处理

大功率激光焊接,因其能量密度极高,被焊工件经受快速加热和冷却的反复作用,使得焊缝区和热影响区域极窄,硬度远远高于母材,该区域的塑性相对较低。为了降低焊接接头的硬度,应采取焊接前预热和焊后回火等相应的工艺措施^[4]。赵晓龙等人^[74]研究了多次热处理对 2 mm TC4 激光焊接接头显微组织及力学性能影响,指出多次热处理后,焊缝区、热影响区显微组织无明显变化,焊缝区力学性能较为优异,抗拉强度达 1 100 MPa,断面收缩率为 10.9%,多次热处理后的力学性能与焊态基本相同,如表 4 所示。Kabir 等人^[75]研究了去应力退火(SRA)和固溶时效处理(STA)对 3.2 mm 和 5.1 mm TC4 激光焊接接头显微组织及力学性能影响(见图 11),指出焊态和去应力退火后显微组织均为马氏体 α' 相

或马氏体 α' 相和魏氏 α 相组成的混合组织,固溶时效处理后显微组织为片状 α 相和层片间 β 相组成。与焊态相比,去应力退火进一步增加了焊缝区和热影响区的硬度,而固溶时效处理降低了焊缝区和热影响区的硬度值,此外,焊缝区的硬度最大,而热影响区的硬度介于焊缝区和母材之间。

表 4 激光焊接接头及多次热处理后的力学性能^[74]

Table 4 Mechanical properties of laser welded joints after multiple heat treatment

多次热处理	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%
焊态	1 139	1 080	10.9
1	1 124	1 056	9.6
2	1 133	1 086	10.1
3	1 123	1 023	10.4
4	1 144	1 084	9.6

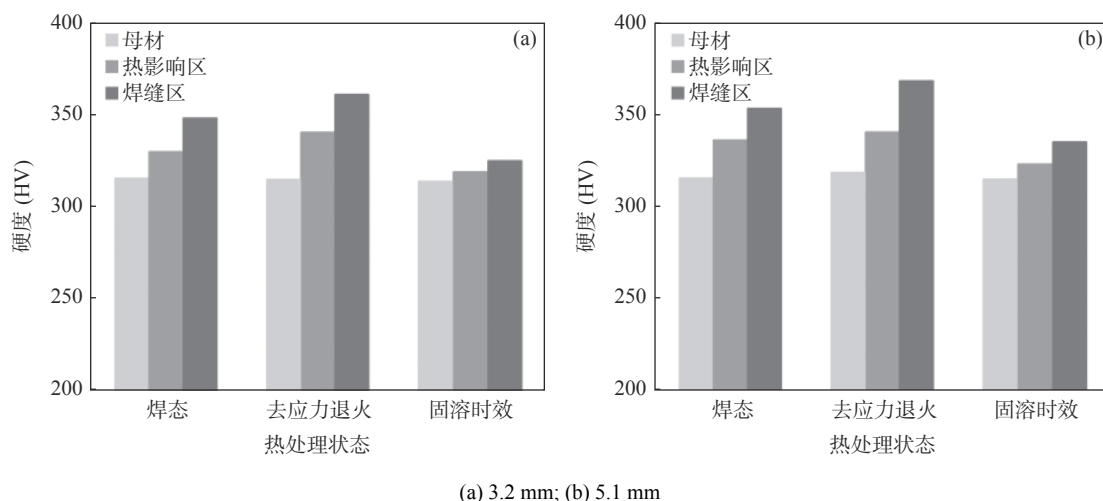


图 11 焊态、SRA 和 STA 条件下三个不同区域的平均硬度

Fig. 11 Average hardness of the three different zones in as-welded, SRA, and STA conditions^[75]

焊后热处理的主要目的在于松弛焊接残余应力、减少畸变、改善焊接接头的性能等,热处理方式常见为单一高温回火或正火加高温回火处理^[76]。低于 β 转变的较高温度下对 TC4 钛合金焊接接头进行固溶处理会导致 α 板条粗化,而在去应力退火过程中,TC4 钛合金焊接接头晶界 α 相仅会出现部分的溶解现象^[74-75]。较高温度下的退火会导致焊缝组织的粗化,并且产生晶间 β 相,造成焊缝弯曲性能的降低。TC4 钛合金在 600 ~ 650 $^{\circ}\text{C}$ 进行焊后热处理,在保证焊接接头性能的基础上可达到最好的焊后消除残余应力的效果^[76-78]。

4 总结与展望

1) 激光焊焊缝几何形状的变化主要原因在于焊接热输入的改变导致焊接过程中激光焊匙孔形状及模式发生了改变;焊缝中无扩散转变形成的针状马氏体是提高焊缝强度的主要组织,可适当调整焊接工艺参数改善焊接接头各显微组织间的最佳占比,获得焊接接头的最佳强韧性匹配;应对激光能量进行严格的控制,控制焊缝温度和激光工艺参数等保证焊缝质量。

2) 目前,关于 TC4 激光焊接工艺大多建立在研究者的经验基础之上,只是针对单个参数的三点法

或四点法进行研究,较少有采用科学的试验设计方法对 TC4 激光焊接工艺体系进行优化设计,可借鉴的研究方法相对较少。

3) 目前,TC4 钛合金激光焊接工艺主要关注于平板对焊试验的工艺研究,对于复杂的形状和结构的部件以及复杂的焊接环境相关方面研究相对较少。

4) 基于人工智能和模拟大数据的发展日益成熟,将激光焊接技术搭载智能分析系统进而实现从模拟、焊接工艺、焊接数据库预测分析为一体的智能焊接系统,进而实现智能化焊接技术的研究是当前有待开发的一项重要应用领域。

参考文献

- [1] Zhang Qiliang. Welding process optimization and research on microstructure and properties for laser weld joints of TC4 titanium alloy[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2014: 12–40.
(张启良. TC4钛合金激光焊接工艺优化及接头组织性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2014: 12–40.)
- [2] Wu Yanpei, Liu Jinhe, Xu Weifeng. Study on welding temperature and joints microstructure of TC4 titanium alloy thin plate in laser weld[J]. *Hot Working Technology*, 2010, 39(15): 145–147.
(吴言沛, 刘金合, 徐韦峰. TC4薄板激光焊接温度和接头微观组织分析[J]. *热加工工艺*, 2010, 39(15): 145–147.)
- [3] Ma Shihui, Li Jiyuan. Influence of shaft shoulder diameter on microstructure and properties of Ti-6Al-4V friction stir welding joint[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(3): 82–87.
(马世辉, 李积元. 轴肩直径对Ti-6Al-4V钛合金搅拌摩擦焊接头组织和性能的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(3): 82–87.)
- [4] Liu Bili, Xie Songjing, Yao Jianhua. Application and development trend of laser welding[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2006, 42(5): 43–47.
(刘必利, 谢颂京, 姚建华. 激光焊接技术应用及其发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 42(5): 43–47.)
- [5] Hou Jijun, Dong Junhui, Zhang Qiliang. Analysis on microstructure and fracture of TC4 titanium alloy laser welded joints[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(3): 35–37, 41.
(侯继军, 董俊慧, 张启良. TC4钛合金激光焊接头显微组织及断口分析[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(3): 35–37, 41.)
- [6] Zhao Xingwang, Liu Yanmei, Fu Heguo, et al. Research on microstructure and mechanical properties of laser butt welding of thin TC4 titanium alloy[J]. *Vacuum*, 2020, 57(4): 89–94.
(赵兴旺, 刘艳梅, 付和国, 等. TC4薄壁钛合金激光对接接头组织及力学性能研究[J]. *真空*, 2020, 57(4): 89–94.)
- [7] Tu Shihao. Research on pulsed laser welding procedure of titanium alloy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015: 1–14.
(涂世豪. 钛合金脉冲激光焊接工艺的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 1–14.)
- [8] Jiang Yi, Zhang Yingyun, Zhu Shengli, et al. Effect of laser power on butt weld morphology of TC4 titanium alloy sheet[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(15): 16–18, 24.
(姜毅, 张颖云, 朱胜利, 等. 激光功率对TC4钛合金薄板对接焊缝形貌的影响[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(15): 16–18, 24.)
- [9] Xu Aiping, Dong Junhui, Zhen Shaoyang, et al. Orthogonal experiment was used to optimize the microstructure of TC4 titanium alloy laser welded joint[J]. *World Nonferrous Metals*, 2020, (8): 170–171.
(许爱平, 董俊慧, 甄邵杨, 等. 焊接功率对TC4钛合金激光焊接头成形与组织性能研究[J]. *世界有色金属*, 2020, (8): 170–171.)
- [10] Xu Z Z, Dong Z Q, Yu Z H, et al. Relationships between microhardness, microstructure, and grain orientation in laser-welded joints with different welding speeds for Ti6Al4V titanium alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(5): 1277–1289.
- [11] Huang Wei, Wang Shaogang, Li Lize, et al. Laser beam welding of titanium alloy and microstructure and mechanical properties of welded joint[J]. *Development and Application of Materials*, 2019, 34(2): 20–27.
(黄伟, 王少刚, 李立泽, 等. 钛合金激光焊及其接头的显微组织与力学性能[J]. *材料开发与应用*, 2019, 34(2): 20–27.)
- [12] Li Mingjun, Chen Hexing, Chen Yongcheng, et al. Effect of welding speed on laser welding formation and microstructure of TC4 titanium alloy[J]. *Welding Technology*, 2017, 46(12): 30–32, 33.
(李明军, 陈和兴, 陈永城, 等. 焊接速度对TC4钛合金激光焊接成形及组织的影响[J]. *焊接技术*, 2017, 46(12): 30–32, 33.)
- [13] Xu Aiping, Dong Junhui, Zhen Shaoyang, et al. Research on optimization of microstructure and properties of laser welded joints of TC4 titanium alloy based on orthogonal experiment[J]. *Mechanical Electrical Information*, 2020, 9: 49–52.
(许爱平, 董俊慧, 甄邵杨, 等. 基于正交实验的TC4钛合金激光焊接头组织性能优化研究[J]. *机电信息*, 2020, 9: 49–52.)
- [14] Li Haigang, Yuan Zhang, Cheng Hao, et al. Influence of welding parameters on porosity in welding of TC4 titanium alloy in two positions[J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2017, 47(6): 43–46.

- (李海刚, 原璋, 程昊, 等. TC4钛合金激光焊中工艺参数对气孔生成量的影响[J]. *宇航材料工艺*, 2017, 47(6): 43–46.)
- [15] Yang Shuo, Song Wenqing, Qu Shen, *et al.* Experimental research on laser welding of thin-walled TC4 titanium alloy[J]. *Welding Joining*, 2019, (1): 5–11.
(杨烁, 宋文清, 曲伸, 等. 薄壁TC4钛合金激光焊缝成形试验研究[J]. *焊接*, 2019, (1): 5–11.)
- [16] Chen Bo, Meng Zheng, Ma Chengyuan, *et al.* Study on welding properties and molten pool flow behavior of TC4 titanium alloy by oscillating galvanometer laser[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(12): 1–13.
(陈波, 孟正, 马程远, 等. 扫描振镜激光TC4钛合金焊接性能及熔池流动行为研究[J]. *航空学报*, 2021, 42(12): 1–13.)
- [17] Kumar B, Bag S, Paul C P, *et al.* Influence of the mode of laser welding parameters on microstructural morphology in thin sheet Ti6Al4V alloy[J]. *Optics and Laser Technology*, 2020, 131: 106456.
- [18] Liu Jing, Gao Xiaolong. Study of high temperature mechanical performance on Ti6Al4V LBW welding joint[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2018, 39(4): 299–305.
(刘晶, 高晓龙. Ti6Al4V脉冲激光焊接接头高温力学性能研究[J]. *河北科技大学学报*, 2018, 39(4): 299–305.)
- [19] Liu J, Gao X L, Zhang L J, *et al.* A study of fatigue damage evolution on pulsed Nd: YAG Ti6Al4V laser welded joints[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, 117: 84–93.
- [20] Cui Li, Li Xiaoyan, He Dingyong, *et al.* Laser-arc hybrid welding of titanium alloy[J]. *Welding Joining*, 2009, (7): 60–64.
(崔丽, 李晓延, 贺定勇, 等. 钛合金的激光-电弧复合焊接[J]. *焊接*, 2009, (7): 60–64.)
- [21] Mou Gang, Hua Xueming, Xu Xiaobo, *et al.* Comparative study on TIG and MIG welding process and performance of 8 mm thick TC4 titanium alloy[J]. *Electric Welding Machine*, 2020, 50(4): 70–74.
(牟刚, 华学明, 徐小波, 等. 8 mm厚TC4钛合金TIG, MIG焊接工艺及性能对比研究[J]. *电焊机*, 2020, 50(4): 70–74.)
- [22] Zhang Long, Chen Donggao, Wang Dafeng, *et al.* Laser-MIG hybrid welding of TC4 titanium alloy[J]. *Ordinance Material Science and Engineering*, 2019, 42(2): 73–77.
(张龙, 陈东高, 王大锋, 等. TC4钛合金激光-MIG复合焊接研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2019, 42(2): 73–77.)
- [23] Zhao An'an, Zhang Yingyun, Hou Lin, *et al.* Dual beam laser welding of TC4T-shape joint by using auxiliary step as filler metal[J]. *Applied Laser*, 2021, 41(2): 276–283.
(赵安安, 张颖云, 侯琳, 等. 含工艺台阶TC4钛合金T形接头的双光束激光焊接[J]. *应用激光*, 2021, 41(2): 276–283.)
- [24] Gao X L, Liu J, Zhang L J, *et al.* Effect of the overlapping factor on the microstructure and mechanical properties of pulsed Nd: YAG laser welded Ti6Al4V sheets[J]. *Materials Characterization*, 2014, 93(7): 136–149.
- [25] Heydari H, Akbari M. Investigating the effect of process parameters on the temperature field and mechanical properties in pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy sheet using response surface methodology[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2020, 106: 103267.
- [26] Jiang D Z, Alsagri A S, Akbari M, *et al.* Numerical and experimental studies on the effect of varied beam diameter, average power and pulse energy in Nd: YAG laser welding of Ti6Al4V[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2019, 101: 180–188.
- [27] Chang B H, Yuan Z, Pu H T, *et al.* A Comparative study on the laser welding of Ti6Al4V alloy sheets in flat and horizontal positions[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7: 376.
- [28] Janasekaran S, Tan A W, Yusof F, *et al.* Influence of the overlapping factor and welding speed on T-joint welding of Ti6Al4V and inconel 600 using low-power fiber laser[J]. *Metals*, 2016, 6: 134.
- [29] Kandaoui M E, Scandella F, Germain L, *et al.* Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V laser welds for airplane floor manufacturing application[C]//Proceedings of the 13th World Conference on Titanium. Wiley, 2016:1551–1556.
- [30] Chang B H, Yuan Z, Cheng H, *et al.* A study on the influences of welding position on the keyhole and molten pool behavior in laser welding of a titanium alloy[J]. *Metals*, 2019, 9: 1082.
- [31] Li C, Li B, Wu Z F, *et al.* Stitch welding of Ti-6Al-4V titanium alloy by fiber laser[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27: 91–101.
- [32] Cheng Donghai, Huang Jihua, Yang Jing, *et al.* Laser welding forming and microstructure of TC4 titanium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(2): 255–258.
(程东海, 黄继华, 杨静, 等. TC4钛合金激光叠焊成形及显微组织[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(2): 255–258.)
- [33] Zhang Yingyun, Zhao An'an, Chen Suming. Study on microstructure and mechanical properties of laser locking surface butt welding of TC4 titanium alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(13): 46–49.
(张颖云, 赵安安, 陈素明. TC4钛合金激光锁面对接焊的微观组织及力学性能研究[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(13): 46–49.)
- [34] Shi Xiangzhong. Welding procedure research in underwater laser welding of TC4 titanium alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 6–11.
(施项中. TC4钛合金水下激光焊接工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 6–11.)
- [35] Huang Lu. Research on controllability technology of TC4 titanium alloy underwater laser wire filling welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 10–11.

- (黄璐. TC4钛合金水下激光填丝焊接控形控性工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 10-11.)
- [36] Gong S L, Pang S Y, Wang H, *et al.* Weld pool dynamics in deep penetration laser welding[M]. Beijing: China Aviation Publishing, 2021: 12-14.
- [37] Dowden J, Postacioglu N, Davis M, *et al.* A keyhole model in penetration welding with a laser[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 1987, 20: 36-44.
- [38] Dowden J, Kapadia P, Postacioglu N, *et al.* An analysis of the laser-plasma interaction in laser key hole welding[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 1989, 22: 741-749.
- [39] Lambrakos S G. Inverse thermal analysis of Ti-6Al-4V laser welds using solidification and heat-affected zone boundaries[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26: 1195-1208.
- [40] Hong K M, Shin Y C. Analysis of microstructure and mechanical properties change in laser welding of Ti6Al4V with a multiphysics prediction model[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 237: 420-429.
- [41] Mashinini P M, Hattingh D G. Influence of laser power and traverse speed on weld characteristics of laser beam welded Ti-6Al-4V sheet[J]. *Materials Research Proceedings*, 2018, 4: 59-64.
- [42] Akbari M, Saedodin S, Toghraie D, *et al.* Experimental and numerical investigation of temperature distribution and melt pool geometry during pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy[J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, 59: 52-59.
- [43] Li Z X, Rostam K, Panjehpour A, *et al.* Experimental and numerical study of temperature field and molten pool dimensions in dissimilar thickness laser welding of Ti6Al4V alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 49: 438-446.
- [44] Cheepu M, Venkateswarlu D, Rao P N, *et al.* Effect of process parameters and heat input on weld bead geometry of laser welded titanium Ti-6Al-4V alloy[J]. *Materials Science Forum*, 2019, 969: 613-618.
- [45] Kurmi J S, P A A, Mahidhara V, *et al.* Experimental investigations on the effect of heat input on CO₂ laser welded Ti-6Al-4V plates[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 912: 032007.
- [46] Gao X L, Zhang L J, Liu J, *et al.* Effects of weld cross-section profiles and microstructure on properties of pulsed Nd: YAG laser welding of Ti6Al4V sheet[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 72: 895-903.
- [47] Liu J, Gao X L, Zhang L J, *et al.* On the use of infrared thermography for analysis of fatigue damage in Ti6Al4V-welded joints[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23: 2965-2972.
- [48] Yang Dongxu. Study on solute elements distribution and heterogeneity of microstructure and mechanical properties of TC4 alloy joints welded by fiber laser beam[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015: 20-28.
(杨东旭. TC4钛合金激光焊接接头溶质元素分布及不均匀性的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 20-28.)
- [49] Akbari M, Saedodin S, Panjehpour A, *et al.* Numerical simulation and designing artificial neural network for estimating melt pool geometry and temperature distribution in laser welding of Ti6Al4V alloy[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016: 11161-11172.
- [50] Akman E, Demir A, Canel T, *et al.* Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209: 3705-3713.
- [51] Köse C, Karaca E. Robotic Nd: YAG fiber laser welding of Ti-6Al-4V alloy[J]. *Metals*, 2017, 7: 221.
- [52] Qiao Liang, Su Xuan, Tao Wang, *et al.* Comparison of microstructure and properties of TC4 alloy under different welding processes[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(3): 19-22.
(乔亮, 苏轩, 陶汪, 等. TC4钛合金不同焊接工艺下组织性能对比[J]. 热加工工艺, 2016, 45(3): 19-22.)
- [53] Ahmed T, Rack H J. Phase transformations during cooling in $\alpha+\beta$ titanium alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, 243: 206-211.
- [54] Xu Jiejie. Research on microstructure and properties of laser welding joints of TC4 titanium alloy[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009: 17-26.
(徐洁洁. TC4钛合金激光焊接接头组织性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009: 17-26.)
- [55] Chen Suming, Zhao An'an, Jiang Yi, *et al.* Effect of TC4 titanium alloy laser filler wire welding process parameters on weld macro formation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 140200.
(陈素明, 赵安安, 姜毅, 等. TC4钛合金激光填丝焊工艺参数对焊缝宏观成型的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 140200.)
- [56] Yang Xiaohua, Yang Wulin, Dui Weizhen, *et al.* Microstructure and microhardness of laser welding joints in TC4 alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2014, 35(10): 70-74.
(杨晓华, 杨武林, 兑卫真, 等. TC4钛合金激光焊接接头微观组织和硬度[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(10): 70-74.)
- [57] Dong Zhijun, Lv Tao, Lei Zhenglong, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser welded TC4 alloys[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2013, (1): 27-30.
(董智军, 吕涛, 雷正龙, 等. 激光焊接TC4钛合金组织性能研究[J]. 航天制造技术, 2013, (1): 27-30.)
- [58] Tian Deyong. Study on the microstructure and defect in the laser welded joint of medium thickness TC4 alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020: 57-58.
(田德勇. 中厚板 TC4 钛合金激光焊接微观组织与缺陷研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020: 57-58.)

- [59] Baruah M, Bag S. Influence of pulsation in thermo-mechanical analysis on laser micro-welding of Ti6Al4V alloy[J]. *Optics and Laser Technology*, 2017, 90: 40–51.
- [60] Yang Jing, Cheng Donghai, Huang Jihua. Effect of laser welding parameters on microstructure and mechanical properties of TC4 welded joints[J]. *Hot Working Technology*, 2007, 36(23): 15–18.
(杨静, 程东海, 黄继华. TC4合金激光焊接工艺参数与接头组织性能研究[J]. *热加工工艺*, 2007, 36(23): 15–18.)
- [61] Yang Jing, Cheng Donghai, Huang Jihua, *et al.* Microstructure and properties of laser welding joint of TC4 titanium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(2): 259–262.
(杨静, 程东海, 黄继华, 等. TC4钛合金激光焊接接头组织与性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(2): 259–262.)
- [62] Zhao Xiaolong, Wang Bin, Gong Shuli, *et al.* Study on microstructure and mechanical properties of laser welded joint of 2 mm thick TC4 titanium alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(9): 209–211.
(赵晓龙, 王彬, 巩水利, 等. 2.0 mm厚TC4钛合金激光焊接接头组织与力学性能研究[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(9): 209–211.)
- [63] Campanelli S L, Casalino G, Mortello M, *et al.* Microstructural characteristics and mechanical properties of Ti6Al4V alloy fiber laser welds[J]. *Procedia Cirp*, 2015, 33: 428–433.
- [64] Li Zhongshu, Zhou Jinyu. Effects of laser welding power on microstructure and fatigue life of TC4 titanium alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(5): 45–47, 51.
(李仲树, 周金宇. 激光焊接功率对TC4钛合金微观组织和疲劳寿命的影响[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(5): 45–47, 51.)
- [65] Aravind A P, Kurmi J S, Swamy P M, *et al.* Optimization of welding parameters in laser welding of Ti6Al4V using VIKOR optimization method[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45: 592–596.
- [66] Xu P Q, Li L J, Zhang C B. Microstructure characterization of laser welded Ti-6Al-4V fusion zones[J]. *Materials Characterization*, 2014, 87: 179–185.
- [67] Liu H, Nakata K, Yamamoto N, *et al.* Microstructural characteristics and mechanical properties in laser beam welds of Ti6Al4V alloy[J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 47: 1460–1470.
- [68] Levine E, Greenhut I, Margolin H. Grain size and grain growth in an equiaxed alpha-beta titanium alloy[J]. *Metallurgical Transactions*, 1973, 4: 2519–2525.
- [69] Li Zheng, Zhao Wei, Zhang Hui. Study on microstructure and mechanical properties of laser welded joint of TC4 titanium alloy[J]. *Journal of Qilu University of Technology*, 2021, 35(4): 48–52.
(李镇, 赵伟, 张辉. TC4钛合金激光焊接接头组织及力学性能研究[J]. *齐鲁工业大学学报*, 2021, 35(4): 48–52.)
- [70] Zhang Yingyun, Zhu Zenghui, Liu Jiangzhe, *et al.* Research on laser welding of 1.2 mm thick TC4 titanium alloy[J]. *Applied Laser*, 2019, 39(4): 596–601.
(张颖云, 朱增辉, 刘江哲, 等. 1.2 mm厚TC4钛合金薄板激光焊工艺研究[J]. *应用激光*, 2019, 39(4): 596–601.)
- [71] Ohmori Y, Nakai K, Ohtsubo H, *et al.* Formation of widmansttten alpha structure in a Ti-6Al-4V alloy[J]. *Materials Transactions*, 1994, 35(4): 238–246.
- [72] Peters M, Williams J C. Microstructure and mechanical properties of a welded ($\alpha+\beta$) Ti alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1984, 15A: 1589–1596.
- [73] Xu P Q. Microstructure characterization of Ti-6Al-4V titanium laser weld and its deformation[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(9): 2118–2123.
- [74] Zhao Xiaolong, Wang Bin, He Enguang, *et al.* Effect of multiple heat treatments on the microstructure and properties of TC4 titanium alloy laser welding joint[J]. *Applied Laser*, 2020, 40(5): 831–835.
(赵晓龙, 王彬, 何恩光, 等. 多次热处理对TC4钛合金激光焊接接头组织和性能的影响[J]. *应用激光*, 2020, 40(5): 831–835.)
- [75] Kabir A S H, Cao X J, Gholipour J, *et al.* Effect of postweld heat treatment on microstructure, hardness, and tensile properties of laser-welded Ti-6Al-4V[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, 43A: 4171–4184.
- [76] Du Yongqin, Zhu Xiaohui, Liu Min, *et al.* Study on the post-weld heat treatment process of Ti-6Al-4V alloy[J]. *Machinist Metal Forming*, 2021, 6: 47–50.
(杜永勤, 祝晓辉, 刘敏, 等. Ti-6Al-4V合金焊后热处理工艺研究[J]. *金属加工:热加工*, 2021, 6: 47–50.)
- [77] Cheng Gaopeng, Xu Jialei, Luo Hao, *et al.* Effect of post-weld stress relief process on bending property of TC4 welded joints[J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50(13): 155–158.
(陈高澎, 徐家磊, 罗皓, 等. 焊后消应力工艺对TC4焊接接头弯曲性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(13): 155–158.)
- [78] Shi Chao. Effect of heat treatment process on microstructure and properties of Ti-6Al-4V titanium alloy[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2016: 48.
(史超. Ti-6Al-4V合金不同热处理工艺组织和性能的研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2016: 48.)