

钛合金激光-TIG 复合焊接保护状态对焊缝成形
及性能影响

史吉鹏, 王红阳, 杨林波, 刘黎明
(大连理工大学 辽宁省先进材料连接技术重点实验室, 大连 116024)

摘 要: 用激光-TIG 复合热源对 2.5 mm 厚 TA15 钛合金进行对接焊试验. 利用万能力学拉伸机、红外热成像仪、电子探针(EPMA)、扫描电镜(SEM)等分析手段对焊接接头进行测试分析, 并与单 TIG 焊进行对比. 分析焊接工艺参数和接头保护时间对焊接接头形貌和性能的影响. 结果表明, 实现 2.5 mm 厚钛合金全熔透焊接时, 激光-TIG 复合焊比单 TIG 焊速度更快、热输入更低, 焊缝和热影响区更窄, 晶粒更细; 相同保护条件下, 激光-TIG 复合焊接头比单 TIG 焊接头具有更高的强度、塑性和更好的疲劳性能; 激光-TIG 复合焊缝冷却速率高于单 TIG 焊, 获得良好的保护状态时所需保护时间更短.

关键词: 激光-TIG 复合焊; 钛合金; 接头性能; 接头保护

中图分类号: TG 407 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2017)02-0061-05

0 序 言

钛合金具有密度小、比强度高、耐蚀性好、耐热性好等一系列优点, 在航空航天、海洋工程、汽车和医疗等领域得到广泛应用^[1]. TA15 钛合金是一种新型的近 α 型中等强度钛合金, 具有良好的工艺性能和使用性能, 已成为飞机结构主要的钛合金用材^[2]. 目前钛合金薄壁结构件常使用钨极氩弧焊(tungsten inert gas, TIG)焊接. 然而 TIG 焊焊接速度较慢, 焊接热输入较大, 这不仅导致焊接生产效率低下, 还会使钛合金焊缝及热影响区变宽、晶粒过度长大, 从而降低接头性能. 焊接钛合金时焊缝保护是影响接头性能的关键因素, 除使用焊枪气流保护熔池外, 还常使用拖罩对焊缝及附近高温区域加以保护. 保护时间过短时接头性能无法保证, 而保护过长时又将影响焊接生产效率并造成资源浪费, 因此合理选择保护时间很有意义.

低功率激光-TIG 复合焊是一种采用低功率激光对 TIG 电弧进行诱导、压缩, 提高 TIG 电弧能量密度的高效、优质焊接方法^[3,4]. 激光的加入可以克服 TIG 焊高速焊接不稳定、焊接效率低的缺点^[5]. 采用低功率激光-TIG 复合热源对 TA15 钛合金薄板进行焊接, 并与 TIG 焊进行对比, 分析了焊接工艺参数和接头保护时间对接头形貌和性能的影响. 为促进激

光-TIG 焊方法在钛合金薄壁结构件焊接中的推广应用提供工艺参数及性能数据支撑.

1 试验方法

选用的焊接材料是 2.5 mm 厚国产 TA15 钛合金薄板, 其成分如表 1 所示.

表 1 TA15 钛合金的化学成分(质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of TA15 titanium alloy

Al	Zr	Mo	V	杂质	Ti
5.5~7.0	1.5~2.5	0.5~2.0	0.8~2.5	≤0.7	余量

焊丝成分与母材一致, 直径为 1 mm. 焊前先用砂纸去除母材和焊丝表面氧化膜, 用丙酮清除表面的有机物和油脂并进行干燥处理. 采用脉冲 YAG 激光-直流 TIG 复合热源(pulsed laser-DC TIG, 以下称“复合热源”)进行冷填丝对接焊接试验, 并与单 TIG 焊进行对比. 采用带焊缝背面保护气槽的夹具固定待焊板材. 试验中激光在前, 垂直板材入射, 激光功率为 500 W, 离焦量为 2 mm; TIG 焊枪与板材呈 45°, 钨极高度为 1.5 mm, 钨极尖端与激光间距为 1.5 mm; 送丝采用前送丝, 送丝角度为 30°. 采用保护拖罩对正面焊缝及附近高温区域进行保护, 拖罩有效保护长度可以调节, 保护时间为拖罩有效保护长度与焊接速度的比值. 使用的保护气体为 99.9% 高纯

氩气,焊枪气流为 15 L/min,拖罩气流为 25 L/min,背面保护气流为 5 L/min. 焊接装置示意图如图 1 所示. 焊接过程中使用 SAT-HY6000 A 型红外热成像仪对焊缝温度进行了测量.

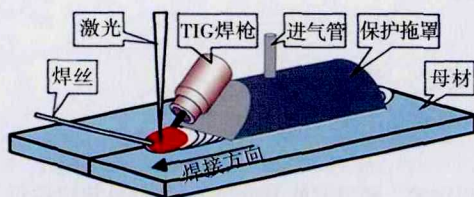


图 1 焊接装置示意图

Fig. 1 Sketch of the experimental device

焊后观察焊缝成形,沿垂直焊缝方向截取试样,经研磨、抛光、使用 kroll 试剂腐蚀后用金相显微镜观察接头横截面形貌及微观组织. 静拉伸与疲劳试样垂直焊接方向截取,分别按照国家标准 GB/T 2651-2008《焊接接头拉伸试验方法》和 GB/T 26076-2010《金属薄板(带)轴向力控制疲劳试验方法》加工,并用砂纸打磨边缘. 疲劳试样为去除了焊缝正反面余高的光滑试样. 疲劳试验加载方式为轴向加载,最大应力水平设为母材静抗拉强度的 60%,应力比 $R=0.1$,加载频率 $f=20$ Hz. 用 EPMA-1600 型电子探针对焊缝横截面元素分析. 用 Zeiss Supra-55 型扫描电镜分析试样断面形貌.

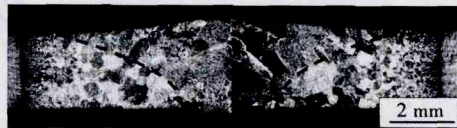
2 试验结果

2.1 焊接接头横截面形貌及微观组织

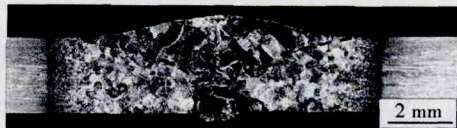
图 2 为不同焊接条件下的接头横截面形貌. 其中图 2a 与图 2b 为单 TIG 焊接头,由图 2a 可以得出,采用单 TIG 焊电流为 170 A、焊接速度为 525 mm/min 时,焊缝熔深不足 1 mm. 由图 2b 可知,当 TIG 焊电流增大至 240 A,而焊接速度降至 325 mm/min 时,可以实现 2.5 mm 厚板材的全熔透焊接. 图 2c 为复合热源焊接接头,与图 2a 对比发现,在图 2a 的参数条件下加入 500 W 激光和电弧复合实现了 2.5 mm 厚板材全熔透焊接,且成形良好. 与图 2b 对比可以发现,当实现板材完全熔透时,复合热源焊接焊缝熔宽为 7.9 mm,明显小于单 TIG 焊时的 10.4 mm;焊缝晶粒为垂直于熔合线向焊缝上表面中心生长的柱状晶,热影响区晶粒以等轴晶为主,复合热源焊接接头焊缝及热影响区晶粒皆明显小于单 TIG 焊接头.



(a) TIG 焊电流 170 A, 焊接速度 525 mm/min



(b) TIG 焊电流 240 A, 焊接速度 325 mm/min



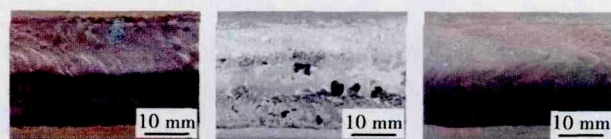
(c) 激光功率 500 W, TIG 焊电流 170 A, 焊接速度 525 mm/min

图 2 焊接接头横截面形貌

Fig. 2 Cross section of joints

2.2 保护时间对焊接接头表面形态的影响

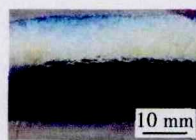
实现焊接熔透的基础上,分析焊接保护对接头形貌及性能的影响. 结果如图 3 所示.



t=0 s

t=2 s

t=6 s

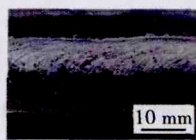


t=12 s

t=20 s

t=40 s

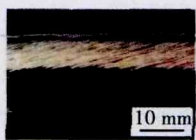
(a) TIG 焊电流 240 A, 焊接速度 325 mm/min



t=0 s

t=2 s

t=6 s



t=12 s

t=20 s

t=40 s

(b) 激光功率 500 W, TIG 焊电流 170 A, 焊接速度 525 mm/min

图 3 不同保护时间下的焊接接头表面形态

Fig. 3 Surface appearance of joints under different protection times

图 3 为分别采用图 2b,c 焊接工艺参数,不同保护时间单 TIG 焊与复合热源焊接头表面形态,如图 3a,b 所示. 可以看出无拖罩保护(即 $t=0$ s)时,单 TIG 焊缝呈砖红色,失去金属光泽,伴有大面积氧化皮脱落;复合热源焊缝呈灰白色且无金属光泽,并出现局部氧化皮脱落. 保护 12 s 时,单 TIG 焊焊缝呈现出具有金属光泽的亮蓝色,而复合热源焊缝呈金黄色. 保护相同时间时,复合热源焊缝表面氧化程度更轻. 保护 20 s 时,单 TIG 焊缝表面呈金黄色,保护状态与复合热源保护 12 s 时相近. 保护 40 s 以上时,复合热源焊缝和单 TIG 焊焊缝均呈现完全未氧化时的亮银色.

2.3 焊缝冷却温度曲线

分别计算了钛合金板材完全焊透时复合热源和单 TIG 焊的焊接热输入,即

$$E = \frac{UI\eta_T + P_L\eta_L}{v} \tag{1}$$

式中: E 为焊接热输入; v 为焊接速度, U 和 I 分别为 TIG 焊电压和电流; P_L 为激光功率; η_T 和 η_L 分别为 TIG 焊电弧和激光的热效率. TIG 焊电弧热效率和焊接速度 v 有关, $v=525$ mm/min 时, η_T 约为 0.8; $v=325$ mm/min 时, η_T 约为 0.7^[6]. 温度接近熔点时金属对激光的吸收率约为 50% 左右^[7],因此 η_L 取 0.5. 测得 TIG 焊电压 $U=10$ V. 经计算,试验中复合热源焊接热输入为 184.2 J/mm;单 TIG 焊热输入为 310.2 J/mm. 复合热源焊接热输入仅为单 TIG 焊热输入的 59.3%.

焊接热输入直接影响焊缝冷却速率. 采用 SAT-HY6000 A 型红外热成像仪测试了冷却不同时间后焊缝的表面温度. 考虑到焊接初始时,焊接状态的不稳定性,因此所选的测试点位于焊缝中线上距离起弧点 50 mm 处,且测试点与热像仪镜头中心的连线垂直于焊接方向,如图 4 所示.

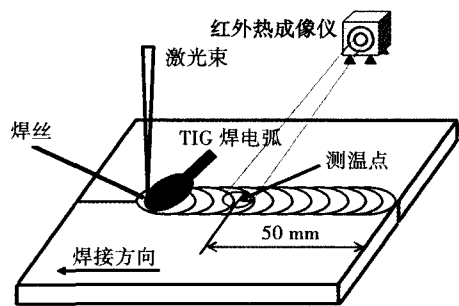


图 4 焊缝温度测试装置示意图

Fig. 4 Sketch of weld seam temperature testing system

所测得不同时间时焊缝表面温度值如表 2 所

示. 从表 2 中可以看出,复合热源焊缝冷却 12 s 以后表面温度即降至 500 ℃ 以下,而单 TIG 焊焊缝冷却 20 s 后表面温度降至 500 ℃ 左右. 对各点的温度值求导得到温度随时间的降低率(冷却速率) Δt ,结果如图 5 所示.

表 2 不同时间焊缝表面温度

Table 2 Temperatures of weld surface at different times

时间 t /s	复合热源温度 T_1 /℃	单 TIG 焊温度 T_2 /℃
0	1 918	2 043
2	1 317	1 618
6	754	1 193
12	492	706
20	375	513
40	256	331

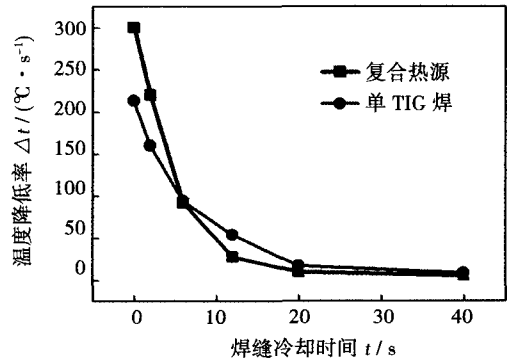


图 5 焊缝冷却温度曲线

Fig. 5 Temperatures curves of cooling weld seam

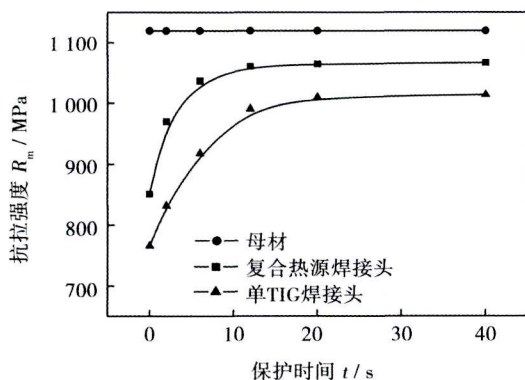
结合表 2 中各时间点的温度值,从图 5 可以看出,冷却时间小于 6 s 时与单 TIG 焊相比,复合热源焊缝冷却速率更高,经过相同冷却时间后焊缝表面温度更低. 而在 6 s 以后,单 TIG 焊焊缝冷却速率略高于复合热源. 在 40 s 时两种焊接方法的焊缝冷却速率相当. 这与保护时间对焊接接头表面形态的影响规律相符.

2.4 保护时间对焊接接头静拉伸性能的影响

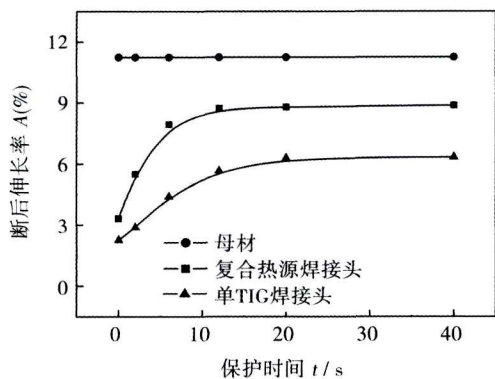
对 TA15 钛合金母材及不同保护时间下的焊接接头进行静拉伸性能测试,焊缝抗拉强度与断后伸长率分别如图 6a 与图 6b 所示.

TA15 钛合金母材抗拉强度为 1 120 MPa,断后伸长率为 11.24%. 无拖罩保护时,单 TIG 焊接头抗拉强度为 766 MPa,为母材的 68%,断后伸长率为母材的 20%;复合热源焊接接头抗拉强度为 851 MPa,为母材的 76%,断后伸长率为母材的 30%. 单 TIG 焊接头保护 20 s 以上时静拉伸性能达到最佳,抗拉强度为 1 010 MPa,达到母材的 90%,断后伸长率达

到母材的 56%。而复合热源焊接接头保护 12 s 以上时,静拉伸性能即可达到最佳,抗拉强度为 1 051 MPa,高达母材的 94%,断后伸长率达到母材的 76%。保护时间相同时,复合热源焊接接头强度和塑性均优于单 TIG 焊接头。复合热源焊接接头静拉伸性能达到最佳所需的拖罩保护时间(12 s)比单 TIG 焊(20 s)短,这与复合热源焊接焊缝冷却 12 s 后温度即降至 500 ℃ 以下,而单 TIG 焊接缝需冷却 20 s 温度才能降至 500 ℃ 的规律相符。



(a) 抗拉强度



(b) 断后伸长率

图 6 不同保护时间下的接头静拉伸性能

Fig. 6 Tensile performances of joints under different protection times

2.5 保护时间对焊接接头疲劳性能的影响

图 7 为不同保护时间下的焊接接头中值疲劳寿命。中值疲劳寿命计算公式为^[8]

$$\log \hat{N}_{50} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log N_i \quad (2)$$

式中: N_i 为焊接接头疲劳寿命观测值, 观测值个数满足要求。 $\hat{N}_{50}$ 为具有 50% 可靠度的中值疲劳寿命。从图 7 中可以看出: TA15 钛合金母材中值疲劳寿命为 29 376 次。无拖罩保护时, 单 TIG 焊接头中值疲劳寿命只有 10 471 次, 仅为母材的 36%; 复合热源焊接接头中值疲劳寿命为 15 488 次, 为母材的 53%。单

TIG 焊接头保护 20 s 时, 中值疲劳寿命接近最佳, 为 22 908 次, 达到母材的 80%。而复合热源焊接接头保护 12 s 以上时中值疲劳寿命即接近最佳, 为 26 302 次, 达到母材的 90%。相同保护时间下, 复合热源焊接接头疲劳性能明显优于单 TIG 焊; 同时疲劳性能最佳的复合热源焊接接头的最短保护时间(12 s)短于单 TIG 焊(20 s)。

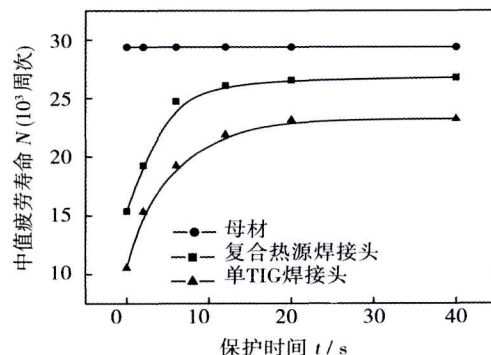
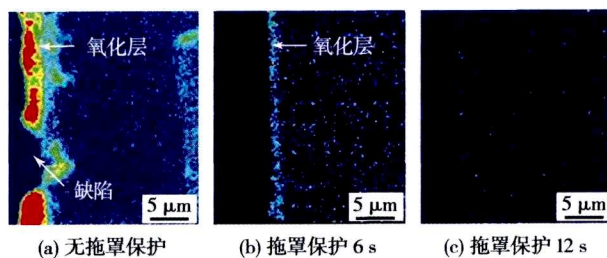


图 7 不同保护时间下的焊接接头疲劳性能

Fig. 7 Fatigue lives of joints under different protection times

3 讨 论

在复合热源焊接钛合金试验中可以看出, 焊接接头性能随保护时间延长而提高, 而保护时间决定了 O, H 等元素对焊缝的污染程度。通过分析复合热源焊缝横截面 O 元素分布, 讨论了 O 元素对复合热源焊接接头性能的影响。图 8 为不同保护时间下的复合热源焊缝 O 元素分布。



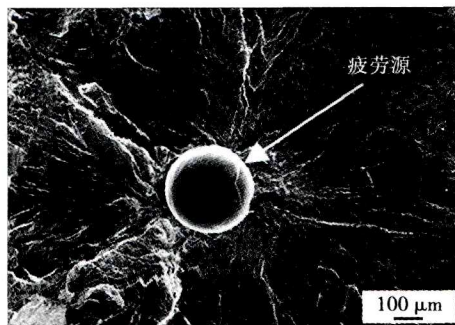
(a) 无拖罩保护 (b) 拖罩保护 6 s (c) 拖罩保护 12 s

图 8 复合热源焊缝横截面 O 元素分布

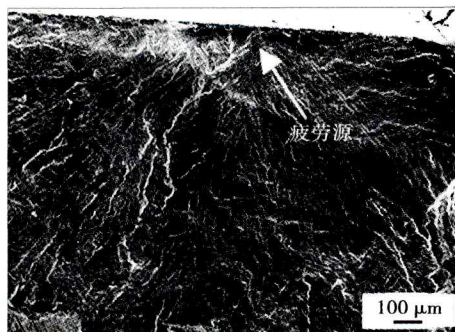
Fig. 8 Oxygen distribution of weld seam by hybrid welding

从图 8 中可以看出, 无拖罩保护时, 焊缝表面剧烈氧化, 形成了较厚的氧化层且出现氧化皮局部脱落现象, 产生缺陷, 导致接头强度与塑性急剧下降; 拖罩保护 6 s 以上时, 焊缝表面形成一层较薄且厚度均匀的氧化层, 对接头性能产生一定影响。拖罩保护 12 s 以上时, 焊缝表面没有氧化层形成, 接头性能最佳。

对复合热源焊接接头的疲劳性能进行了测试. 由于焊缝表面氧化层随余高一并被加工去除,因此认为复合热源焊接接头疲劳性能下降主要受 H 元素影响. 图 9 为不同保护时间下的复合热源焊接接头疲劳断口的裂纹源形貌.



(a) 无拖罩保护



(b) 拖罩保护 12 s

图 9 疲劳裂纹源形貌

Fig. 9 Features of fatigue cracking sources

从图 9 中可以看出,无拖罩保护时焊缝内部出现氢气孔,疲劳裂纹从气孔形成并向周围辐射扩展,导致了接头疲劳性能急剧降低;保护 12 s 以上时由于焊缝表面温度已低于 500 ℃,焊缝吸氢量较少,对接头疲劳性能影响较小,疲劳裂纹从试样熔合区附近表面形成,向试样内部扩展.

4 结 论

(1) 与单 TIG 焊相比,复合热源焊接效率更高、焊接热输入更低,焊接钛合金时复合焊缝宽度更窄,晶粒更细.

(2) 复合热源焊缝比单 TIG 焊冷却速率更高,保护相同时间时焊缝污染程度更低.

(3) 拖罩保护时间相同时,复合热源接头强度、塑性和疲劳性能均优于单 TIG 焊;获得理想力学性能时,复合热源焊接接头需要的保护时间更短.

参考文献:

- [1] 周水亮,陶 军,杜欲晓,等. 细晶粒钛合金薄板 TIG 焊温度场分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(12): 33-36.
Zhou Shui liang, Tao Jun, Du Yuxiao, *et al.* Analysis of temperature field for TIG welding fine grain titanium alloy thin sheet[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(12): 33-36.
- [2] 陈国庆,张秉刚,王 廷,等. TA15 钛合金潜弧焊接头组织与性能分析[J]. 焊接学报, 2010, 30(7): 5-8.
Chen Guoqing, Zhang Binggang, Wang Ting, *et al.* Microstructure and mechanical properties of submerged arc welded TA15 titanium alloy joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 30(7): 5-8.
- [3] Page C J, Devermann T, Biffin J, *et al.* Plasma augmented laser welding and its applications[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2002, 7(1): 1-10.
- [4] Liu L, Hao X, Song G. A new laser-arc hybrid welding technique based on energy conservation[J]. Materials Transactions, 2006, 47(6): 1611-1614.
- [5] 刘黎明,王红阳,宋 刚. 能源节约型激光诱导电弧复合焊接技术及应用[J]. 焊接学报, 2015, 36(11): 9-12.
Liu Liming, Wang Hongyang, Song Gang. Energy-saving mode laser induced arc hybrid welding technology and application[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(11): 9-12.
- [6] Kou S. Welding Metallurgy[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- [7] Chen F F. Introduction to plasma physics[M]. New York: Plenum Press, 1974.
- [8] 李晓延,巩水利,陈 俐. TC4 钛合金薄板高能束焊接接头疲劳性能研究[J]. 航空材料学报, 2005, 25(4): 26-29.
Li Xiaoyan, Gong Shuili, Chen Li. A study of fatigue life of TC4 titanium alloy sheet and its high density beam welded joints[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005, 25(4): 26-29.

作者简介: 史吉鹏,男,1984 年出生,博士研究生. 主要从事钛合金复合热源焊接技术研究. 发表论文 5 篇. Email: shijp@mail.dlut.edu.cn

通讯作者: 刘黎明,男,教授,博士研究生导师. Email: liulm@dlut.edu.cn