

# 活性剂对 TC4 薄板背反射增效激光焊接成形的影响

王宏宇<sup>1</sup>, 丁瑞<sup>1</sup>, 晁栓<sup>2</sup>, 李乐<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013; 2. 镇江市农业机械技术推广站, 镇江 212013)

**摘要:** 为探索降低钛合金薄板激光 X 形焊接成形所需能量阈值的途径, 较为系统地分析了活性剂的种类、涂覆厚度和涂覆位置对钛合金薄板背反射增效激光焊接成形的影响。结果表明, 不同种类的活性剂的影响不同, 其中涂覆 NaCl 和 NaF 有利于背反射羽辉效应的形成, 而涂覆 TiO<sub>2</sub> 时则对其有一定的弱化。同时, 随着活性剂涂覆厚度的增大背反射羽辉效应进一步增强, 且 NaF 相对于 NaCl 而言对涂覆厚度更加敏感。此外, 在施焊背面涂覆活性剂几乎没有影响。分析认为, 活性剂对钛合金薄板背反射增效激光焊接成形的影响, 主要归因于其对激光能量吸收的增益。

**关键词:** 钛合金薄板; 激光焊接; 背反射羽辉效应; 活性剂; 焊缝形貌

中图分类号: TG 456.7 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.2019400045

## 0 序 言

钛合金薄板的高品质高效焊接成形, 是“轻量化设计与制造”这一工程热点研究领域中的一个重要研究主题, 激光焊接则是钛合金薄板焊接成形的主要方法之一<sup>[1-3]</sup>。

众所周知, X 形焊缝要较 V 形焊缝具有更好的力学性能且其焊接变形也小, 故钛合金薄板激光焊接成形时更希望获得 X 形焊缝。然而, 钛合金薄板激光深熔焊成形获得 X 形焊缝所对应的激光能量阈值一般较高<sup>[4-6]</sup>。高的激光能量阈值, 势必会引起如焊接接头组织恶化、残余应力梯度增大等焊接缺陷趋于显著等问题<sup>[6]</sup>。可见, 降低钛合金薄板激光 X 形焊接成形所需能量阈值的研究, 对于钛合金薄板的高品质高效焊接成形具有重要的理论意义和现实意义。

在降低钛合金薄板激光 X 形焊接成形所需能量阈值的相关研究中, 活性激光焊是其中极具代表性的研究之一<sup>[6]</sup>。活性激光焊的基本原理是焊接前在焊接区涂敷一层以卤化物或氧化物为主要组成的活性剂, 以发挥活性剂所具有的增加钛合金对激光能量吸收等作用<sup>[7]</sup>。在前期研究中, 提出了另一

种钛合金薄板高效激光焊接方法—背反射增效激光焊<sup>[8]</sup>, 其基本思想是在钛合金薄板背面增加距离一定的金属垫板, 利用薄板全熔透瞬间进入背面的激光束, 对金属垫板产生烧蚀, 进而在施焊钛合金薄板背面形成金属蒸气云羽辉重新作用回背面焊接区, 实现了在常规激光焊接仅能获得 V 形焊缝的低能量阈值工艺条件下即可获得 X 形焊缝。

综上可见, 若在背反射增效激光焊中引入活性剂, 则可望进一步降低钛合金薄板激光 X 形深熔焊成形所需临界阈值, 进而提高钛合金薄板激光焊接的品质。文中采用单因素试验方法较为系统地分析了活性剂的种类、涂覆厚度和涂覆位置对钛合金薄板背反射增效激光焊接成形的影响, 旨在发展和完善这一新型钛合金薄板高效激光深熔焊的理论与方法。

## 1 试验方法

试验用材料为市购 0.6 mm 厚 TC4 钛合金薄板, 线切割成 40 mm × 25 mm 的试样。采用 YLS-2000 型光纤激光器进行对焊, 试验中用保护气体为高纯氩气, 背面垫板为市购普通铝板。

活性剂主要包括氯化物、氟化物、氧化物这三类, 而这三类活性剂中较常见且易获得的分别是 NaCl, NaF 和 TiO<sub>2</sub>, 故选用这三种作为试验用活性剂。首先, 将三种活性剂分别置于研钵中充分研磨,

使活性剂颗粒成细粉状, 装入试剂瓶内待用。然后, 用电子天平精确称量研磨好的活性剂粉末, 并按照 1:1 的质量比将其与无水乙醇调制成糊状, 使用扁平毛刷在试样单面或双面均匀涂覆糊状活性剂, 干燥后进行焊接。活性剂涂覆宽度约为 15 mm, 文中无特别说明时涂覆厚度均为约 0.1 mm。

整个试验过程中激光功率 300 W, 扫描速度 500 mm/min, 离焦量 0, 氩气流量为 15 ml/min 参数不变, 此工艺条件下传统活性激光焊(正面涂覆 0.1 mm NaF)即施焊薄板背面未加垫板时获得的是 V 形焊缝。此外, 垫板距施焊薄板背面距离为 0.1 mm, 由于此距离较小, 试验过程中通过在薄板背面粘贴 0.05 mm 标签纸来实现距离控制。两种激光焊接方法原理如图 1 所示。

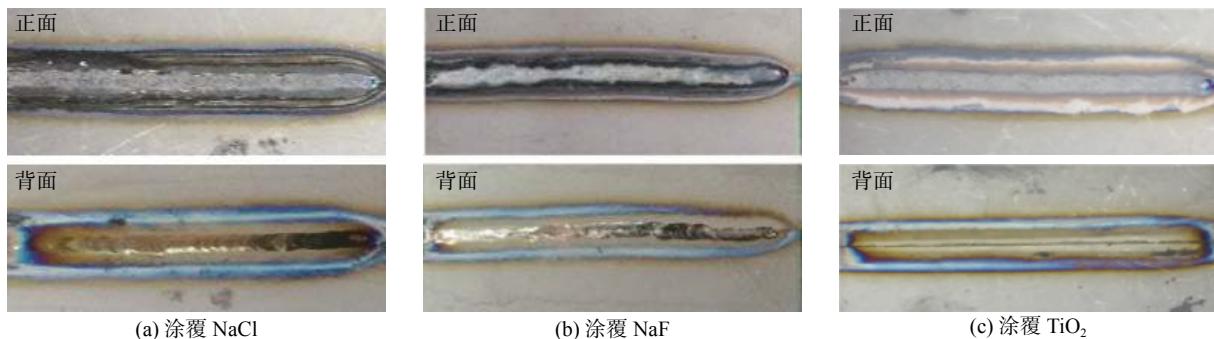


图 2 正面涂覆 0.1 mm 活性剂后焊接接头宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic morphologies of welding joint with 0.1 mm activator layer coated on the positive

从图 2 中可以看出, 在相同激光焊接工艺条件下, 涂覆不同种类活性剂后焊接接头的形貌存在较大差别。涂覆 NaCl 的焊接区宽度(宏观形貌中钛板表面颜色发生变化的区域), 无论是正面还是背面均略大于涂覆 NaF 和 TiO<sub>2</sub> 的焊接区宽度。这一结果表明, 施焊薄板涂覆 NaCl 对激光能量吸收的增益最大, NaF 次之, TiO<sub>2</sub> 最弱。同时, 涂覆 NaCl 的焊缝背面平整且呈亮金色(将这一特征定义为背反射羽辉特征, 其对应形成机制称作背反射羽辉效应), 而且此时焊缝光滑均匀连续, 表明其焊接过程非常稳定, 如图 2a 所示。涂覆 NaF 的焊缝背面也呈现出背反射羽辉特征, 但焊缝连续性及平整度略差(图 2b)。而涂覆 TiO<sub>2</sub> 的焊缝背面, 则可见明显未焊时的拼接痕迹, 表明此时钛合金薄板未实现全熔透焊接(图 2c)。

图 3 是在钛合金薄板施焊正面涂覆不同种类活性剂焊接接头的横截面形貌。其中, 图 3a, b, c 分别是涂覆 NaCl, NaF 和 TiO<sub>2</sub> 的形貌。

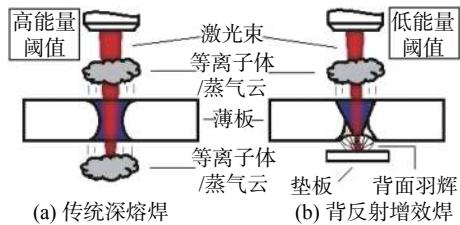


图 1 两种激光深熔焊原理对比图

Fig. 1 Principle comparison diagram of two kinds of laser deep penetration welding

## 2 试验结果与分析

### 2.1 活性剂种类的影响

图 2 是在钛合金薄板施焊正面涂覆不同种类活性剂焊接接头的正面和背面宏观形貌。其中, 图 2a, b, c 分别是涂覆 NaCl, NaF 和 TiO<sub>2</sub> 的焊缝宏观形貌。

从图 3 中可以看出, 涂覆不同种类活性剂的焊缝横截面中, 图 3a 与图 3b 近似相同, 与图 3c 差别较大。其中, 涂覆 NaCl 的焊缝横截面呈底部略宽的“X 形”, 焊缝横截面顶部平整且顶部中间区域略凸(图 3a)。涂覆 NaF 的焊缝横截面呈顶部略宽的“X 形”, 焊缝横截面顶部平整且顶部中间区域微凹(图 3b)。而涂覆 TiO<sub>2</sub> 的焊缝横截面则呈未焊透的“碗形”, 同时焊缝底部存在有较大的气孔(图 3c)。此外, 涂覆 NaCl 和 NaF 两种活性剂的焊缝背面非常平整(图 3a, b), 这与前期研究中所指出的背反射羽辉效应, 对施焊薄板背面焊接区不仅有热效应而且具有力效应直接相关<sup>[8]</sup>。可见, 背反射增效激光焊具有很好的成形性尤其是其背面成形性极佳。

根据上述结果可见, 在钛合金薄板施焊正面涂覆 NaCl 活性剂呈现出明显的背反射羽辉特征, 涂覆 NaF 活性剂的背反射羽辉特征稍弱, 而 TiO<sub>2</sub> 活性剂则对背反射羽辉效应有一定程度的弱化。结合

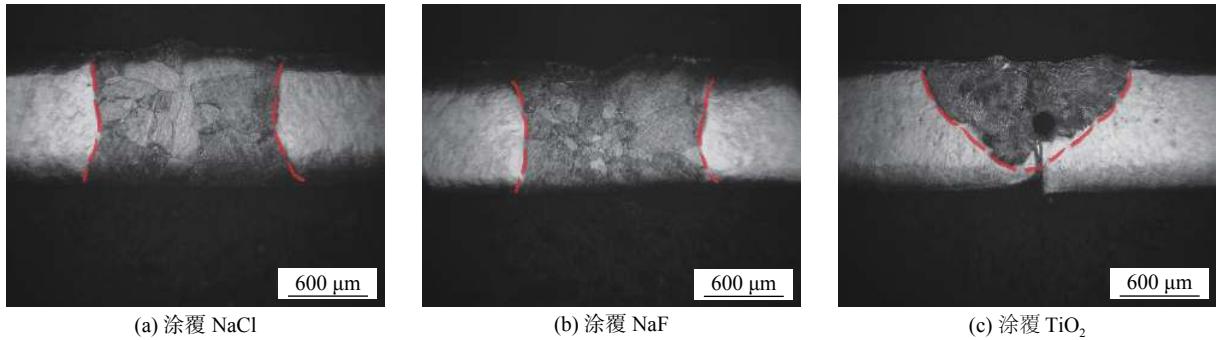


图 3 正面涂覆 0.1 mm 活性剂后焊接接头横截面形貌

Fig. 3 Cross-sectional morphologies of welding joint with 0.1 mm activator layer coated on the positive

背反射羽辉效应形成机制<sup>[8]</sup>分析认为, 在背反射羽辉效应形成过程中, 薄板全熔透焊接时穿透薄板进入施焊背面区域的激光能量是其主要因素, 直接决定着背面垫板在激光束作用下诱导的羽辉作用的强弱, 故可以认为活性剂对背反射增效激光焊接成形的影响主要在于其对激光能量吸收的增益。涂

覆  $\text{TiO}_2$  的薄板未实现全熔透, 则可能与其一定程度上降低了钛合金薄板对激光能量的吸收有关。

## 2.2 活性剂涂覆厚度的影响

图 4 是施焊薄板正面涂覆较厚 (0.3 mm) 不同种类活性剂时焊接接头的横截面形貌。其中, 图 4a, b, c 分别是涂覆  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaF}$  和  $\text{TiO}_2$  的形貌。

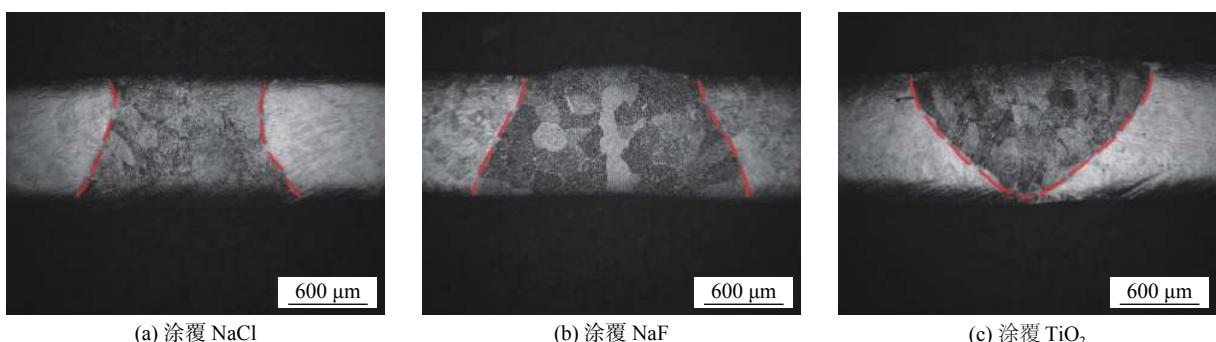


图 4 正面涂覆 0.3 mm 活性剂后焊接接头横截面形貌

Fig. 4 Cross-sectional morphologies of welding joint with 0.3 mm activator layer coated on the positive

从图 4 中可以看出, 涂覆较厚一层活性剂后, 涂覆  $\text{NaCl}$  和  $\text{NaF}$  的焊缝横截面呈近似“梯形”, 而且涂覆  $\text{NaF}$  的焊缝底部较涂覆  $\text{NaCl}$  的焊缝底部要宽约 25%, 同时其梯形特征更加明显, 并且其焊缝横截面面积也较涂覆  $\text{NaCl}$  的焊缝要多约 12% (图 4a, b)。进一步与图 3 对比可以得出,  $\text{NaF}$  在提高激光能量吸收方面对活性剂涂覆厚度较  $\text{NaCl}$  更加敏感。对于涂覆  $\text{TiO}_2$  的焊缝截面尽管熔深略有增大但仍未全熔透 (图 4c)。

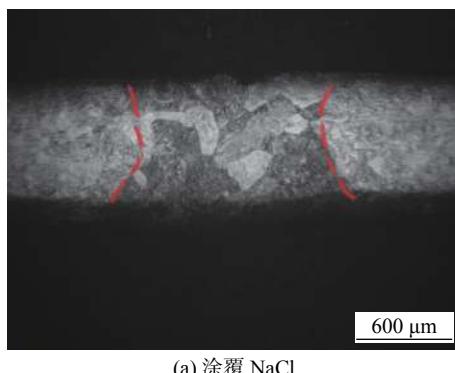
分析认为, 当活性剂涂覆厚度增大后, 其对激光能量吸收的增益随之增大, 有利于激光深熔焊穿透小孔向纵深发展, 作用在小孔前沿的能量密度也随之增大, 故激光穿透薄板瞬间作用到背面垫板的激光能量密度增大, 从而背反射羽辉效应得到增强。这一结果, 也再次证实了背反射羽辉效应的形

成与作用在背面垫板的激光能量直接相关。但是, 活性剂涂覆厚度也不宜太厚, 若活性剂涂覆厚度过大, 不仅活性剂涂覆厚度的均匀性很难保证而且还会带来其它问题, 如焊接过程飞溅增大等。活性剂涂覆厚度以不超过 0.3 mm 为宜。

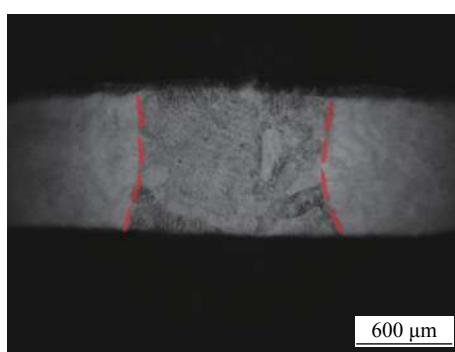
## 2.3 活性剂涂覆位置的影响

根据前述分析可知, 在钛合金薄板正面涂覆活性剂, 有利于背反射羽辉效应的形成。同时, 适当地增大活性剂涂覆厚度, 有助于背反射羽辉效应的增强。活性剂对背反射羽辉效应的这两方面作用主要归因于其对激光能量吸收的增益。为了深入考察活性剂在背反射羽辉效应所形成作用方面的影响, 文中在正面和背面涂覆了同样厚度的活性剂。鉴于正面涂覆  $\text{TiO}_2$  时未能实现钛合金薄板的全熔透焊接, 故文中仅考察了涂覆  $\text{NaCl}$  和  $\text{NaF}$  时的情况。

图 5 是钛合金薄板施焊正面和背面均涂覆活性剂时焊缝接头的横截面形貌。其中, 图 5a, b 分别是涂覆 NaCl 和 NaF 的形貌。将图 5 与图 3 进行对比可以看出, 双面都涂覆活性剂后, 此时焊缝横截面形状仍呈“X 形”, 与仅正面涂覆活性剂时横截面形貌基本一致, 此时焊缝背面熔宽并未显著增大, 这一结果表明在钛合金薄板施焊背面涂覆活性剂并不能有效增强背反射羽辉效应所形成的积极作用。分析原因可能在于, 活性剂对激光束所施加能量的响应机制与其对背面垫板诱导羽辉增效能量的响应机制不同, 背面垫板诱导羽辉增效能量其热作用更多的应该是热辐射。



(a) 涂覆 NaCl



(b) 涂覆 NaF

图 5 双面涂覆 0.1 mm 活性剂后焊接接头横切面形貌  
Fig. 5 Cross-sectional morphologies of welding joint with 0.1 mm activator layer coated on double sides

### 3 结 论

(1) 在钛合金薄板施焊正面涂覆活性剂, 有利于背反射羽辉效应的形成, 这主要归因于其对激光能量吸收的增益; 文中试验条件下, NaCl 和 NaF 的效果较好, 而  $TiO_2$  时则存在一定的弱化。

(2) 随着活性剂涂覆厚度的增大, 背反射羽辉

效应进一步增强, 钛合金薄板激光焊缝形貌由“X 形”转变为“梯形”。同时, 相对于 NaCl 而言, NaF 对涂覆厚度更加敏感。

(3) 在钛合金薄板施焊背面涂覆活性剂, 对钛合金薄板背反射增效激光焊接成形几乎没有影响, 分析认为这与活性剂对背面垫板诱导羽辉增效能量主要以热辐射作用为主的响应机制有关。

### 参 考 文 献:

- [1] 国家自然科学基金委员会. 机械工程学科发展战略报告(2011-2020)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 程东海, 黄继华, 林海凡, 等. TC4 钛合金激光拼焊接头显微组织及力学性能分析 [J]. 焊接学报, 2009, 30(2): 103 - 106.  
Cheng Donghai, Huang Jihua, Lin Haifan, et al. Microstructure and mechanical analysis of Ti-6Al-4V laser butt weld joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(2): 103 - 106.
- [3] Gao X L, Zhang L J, Liu J, et al. A comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding and TIG welding of thin Ti6Al4V titanium alloy plate[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 529: 14 - 21.
- [4] Peter S, Rudolf W, Thomas G, et al. Utilizing laser power modulation to investigate the transition from heat-conduction to deep-penetration welding[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 224 - 231.
- [5] 陈 倒, 胡伦骥, 巩水利. 薄板钛合金激光焊熔透稳定性临界条件的计算 [J]. 焊接学报, 2005, 26(11): 35 - 38.  
Chen Li, Hu Lunji, Gong Shuili. Mathematical model of the stable full penetration laser welding for titanium alloy sheet[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(11): 35 - 38.
- [6] 董丽娜, 张建勋. Ti6Al4V 激光焊接接头非均匀梯度特征研究现状 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(3): 655 - 660.  
Dong Lina, Zhang Jianxun. Research status of heterogeneous gradient feature for laser welded joint of Ti6Al4V alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(3): 655 - 660.
- [7] 孙 昊, 张兆栋, 刘黎明. 镁合金的低功率激光活性焊 [J]. 焊接学报, 2007, 28(4): 49 - 52, 57.  
Sun Hao, Zhang Zhaodong, Liu Liming. Low power laser welding of magnesium alloy with activating flux[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(4): 49 - 52, 57.
- [8] 王宏宇. 实现金属薄板单面焊接双面成形的高效激光深熔焊方法: 中国, 201410225961.2[P]. 2014-05-26.

第一作者简介: 王宏宇, 男, 1974 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要从事激光先进制造技术方面的科研和教学工作。发表论文 60 余篇。Email: [wangdoudou1974@163.com](mailto:wangdoudou1974@163.com)