

制造技术研究

TC4 钛合金薄板 T 型接头激光焊接工艺研究

孙燕洁 徐艳利 李 瑞

(北京新凤机械厂, 北京 100854)



摘要: 通过对 TC4 板材进行两种 T 型接头的激光焊接试验, 分析了酸洗、焊接环境及焊后修复对钛合金激光焊接接头质量的影响, 实验结果表明, 钛合金激光焊具有较强的气孔倾向, 酸洗及焊后重熔并未明显改善接头气孔的情况, 但气孔数量对湿度的变化较为敏感。不同焊接试验的结果统计表明, 虽然接头存在大量气孔, 但只有位于上下两侧板材的贴合面处的这一小部分气孔才会造成受力面积的减小, 因此接头整体仍具有较高的抗剪力。

关键词: 激光焊; 钛合金; T 型接头; 抗剪力

Laser Welding for T-joints of TC4 Titanium Alloy Sheets

Sun Yanjie Xu Yanli Li Rui

(Beijing Xinfeng Machinery Factory, Beijing 100854)

Abstract: Two kinds of T-joints were investigated to learn the laser welding technique with TC4 titanium alloy sheets. Effects of acid wash, welding environment and post-weld reparation to the quality of the weld bead were studied. Experimental results show that porosities are the main defect in the titanium weld joint with laser welding. Porosities are very sensitive to the humidity of the environment, while acid wash and re-welded can not reduce the number of porosities effectively. Although there are so many porosities in the weld bead, statistics of experimental results show that the shearing force of the weld joint is very high. This proved that not all porosities can reduce the area of the shearing force working on, but porosities on the surface between upside plate and underside plate of the T-joint have this effect. Thus, the intergral joint still has high shearing resistance.

Key words: laser welding; titanium alloy; T-joint; shearing resistance

1 引言

钛合金具有优越的比强度、塑性和韧性, 是追求结构轻质, 且服役条件恶劣的航空航天重要件、关键件的首选材料。钛合金在高温下具有极强的晶粒长大倾向, 采用传统的焊接方法, 焊接热影响区和焊缝内部晶粒粗化现象严重, 进而影响接头尤其是热影响区的塑性韧性^[1~3]。因此能量密度高、热输入低的激光焊、电子束焊等高能束焊接方法是获

得高强度钛合金焊接接头的首选^[4]。而由于不受真空室的空间限制, 且随着光纤传输的固体激光器和光纤激光器发展, 激光焊在加工柔性和生产成本上较电子束焊接有明显的优势^[5]。

激光焊具有热输入低、速度快、能量集中^[6]、便于保护等诸多优势, 是近十年发展最快的焊接方法之一, 特别是大功率激光器的面世, 大大推动了激光焊接的发展。近年来航天构件不断追求轻质高强, 使得激光焊接在航天领域的需求更为迫切。然

作者简介: 孙燕洁 (1968-), 高级工程师, 焊接专业; 研究方向: 焊接工艺技术。

基金项目: 航天二院质量与技术基础资助项目 (E08D002)。

收稿日期: 2010-03-26

而，作为一种新兴的焊接方法，激光焊接缺乏针对钛合金相关的焊接标准及质量判定依据，尤其是缺乏航空航天领域的相关标准，在一定程度上限制了该方法在航空航天领域的推广。

为了满足轻质高强的要求，航天某部件采用骨架蒙皮焊接结构代替全实体结构，大大降低了部件的重量，但也对该部件的焊缝质量提出了较高的要求。该部件采用激光焊接方法，将多块蒙皮焊在骨架上，形成外形封闭结构，所有焊缝接头形式为连接骨架与蒙皮的 T 型焊接接头。本文以 TC4 材料为主，基于该部件典型接头形式，研究了钛合金激光焊接焊前准备、焊接环境、焊后修复等因素对接头质量的影响，旨在为制定钛合金激光焊工艺提供参考。

2 焊接试验

2.1 试验材料

试验采用 TC4 薄板 T 型焊接接头方式。焊前将 1mm 厚 TC4 板材加工为 100mm×100mm 的试片，T 型接头底侧采用 30mm×100mm×2.5mm TC4 板材作为垫板。焊前按照 QJ1572-88《钛合金化学酸洗技术条件》进行化学清洗，去除表面油污和氧化层。

试验采用的激光加工系统包括德国 TRUMPF 公司的 2.2kW 连续 YAG 固体激光器；直径 600 μ m 的 30m 激光传输光纤；聚焦透镜焦距 200mm 的焊接头；德国 KUKA 公司的 KR30HA 机器人。焊接采用纯度为 99.99% 的氩气保护，激光脉冲焊接，平均输出功率为 750W，焊接速度 1m/min，离焦距 -2mm。

2.2 试验方法

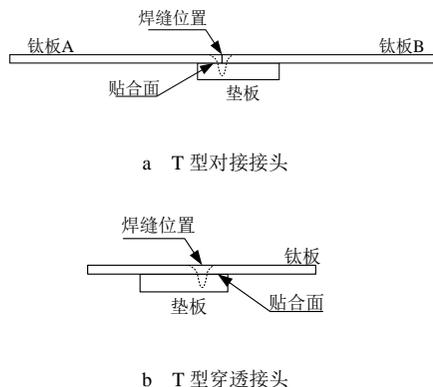


图 1 某部件两种典型接头形式示意图

根据航天某部件典型接头及其受力方式，设计了试片及力学实验方法。该结构两种主要接头形式见图 1，图 1a 的接头为两板对接，底部有垫板，本文简称为 T 型对接接头；图 1b 为上侧板材与下侧板垫板穿透焊接的接头，本文简称为 T 型穿透接头。该部件工作中的两种接头主要受剪切力，图 1 所示的贴合面部位的焊缝是接头主要受力部位。

由于两种接头在该部件中性能要求相同，本文设计的焊接试片如图 2a 所示，T 型对接焊缝和 T 型穿透焊缝在试片上平行焊接，焊后将试片加工成宽 10mm 的拉伸试片，并按图 2b 所示将上端两条焊缝中间的钛板切开。图 2b 所示的拉伸实验中，实际受力部位为连接上下板材的贴合面处的焊缝，接头承受剪切力。力学测试可以获得焊缝单位长度的抗剪力，除以贴合面熔宽，即可获得接头抗剪强度。实验中，两条焊缝只有一条发生断裂，因此所得实验结果为两条焊缝中力学性能薄弱的一侧。

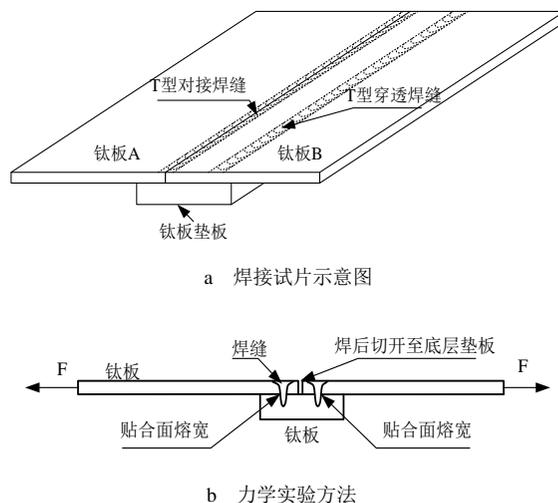


图 2 试片焊接接头形式及力学试验示意图

3 试验结果

3.1 酸洗对焊接接头质量的影响

为了研究钛合金激光焊中酸洗及酸洗后存放时间对焊接接头质量的影响（见表 1），本文进行了对比试验，酸洗后试片存放于烘干炉内，未酸洗的试片在焊前用乙醇除油。

表 1 酸洗及存放时间对接头质量的影响

| 试片序号 | 酸洗后存放时间/d | 接头形式 | 单个气孔最大尺寸/mm | 100mm 长焊缝气孔数量/个 | 100mm 长焊缝气孔累计长度/mm |
|------|-----------|-------|-------------|-----------------|--------------------|
| 1 | 未酸洗 | T 型对接 | 0.5 | 10 | 4 |
| | | T 型穿透 | 0.4 | 9 | 3.6 |
| 2 | 1 | T 型对接 | 0.7 | 20 | 6 |
| | | T 型穿透 | 0.5 | 22 | 8.8 |
| 3 | 5 | T 型对接 | 0.4 | 12 | 3.6 |
| | | T 型穿透 | 0.4 | 9 | 2.7 |
| 4 | 20 | T 型对接 | 0.8 | 20 | 6 |
| | | T 型穿透 | 0.5 | 16 | 5 |

从表 1 所示的实验结果可以看出,相同条件下,由于对接间隙的存在, T 型对接接头较 T 型穿透接头的气孔尺寸和数量略有增加。而是否酸洗及酸洗后存放时间长短,对气孔尺寸和数量的影响并不明显。

3.2 温湿度对焊接接头质量的影响

焊接环境是影响焊接气孔的主要因素之一,图 3、图 4 为不同温度和湿度条件下焊接接头气孔的尺寸及数量变化情况。

焊缝中最大气孔集中在 0.5~0.8mm 之间,随着湿度的增加,最大气孔尺寸变化并不明显。从图 3b 所示的气孔数量变化可以看出,随着湿度的增加,气孔数量呈现出明显的上升趋势。

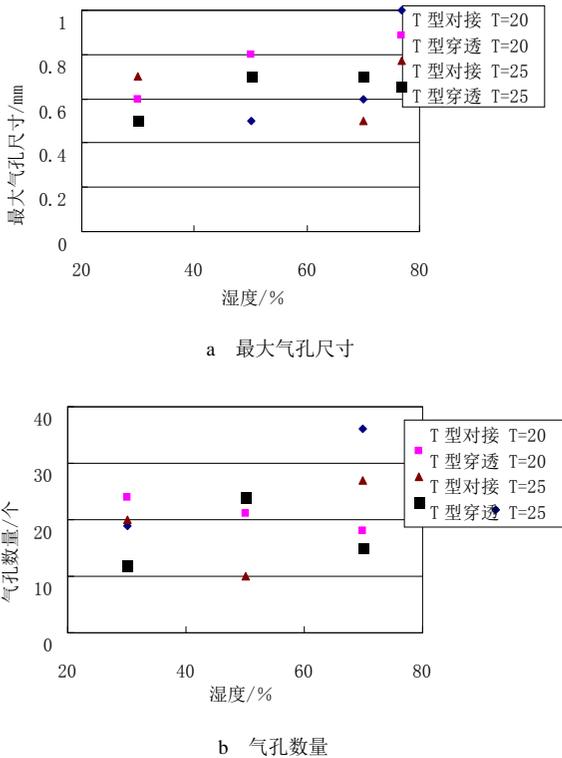


图 3 湿度对接头质量的影响

图 3 为不同湿度下气孔尺寸及数量的变化情况。其中,图 3a 所示为焊缝内最大气孔尺寸,可以看出,

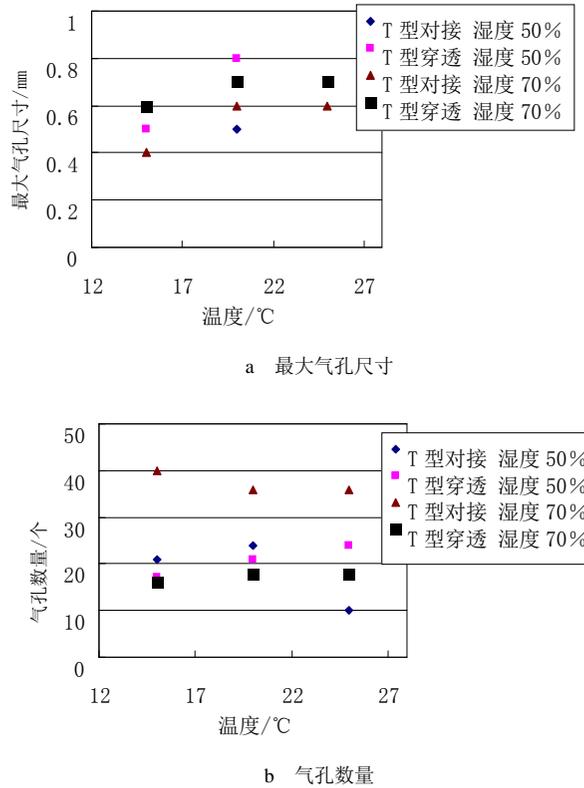


图 4 环境温度对接头质量的影响

如图 4 所示,焊缝最大气孔随着环境温度的增加而略有上升,但缺陷的数量随着温度的增加变化并不显著。从图 3 和图 4 可以看出,钛合金激光焊具有很强的气孔倾向,但在设备允许的范围内,尽可能降低焊接环境湿度,对控制气孔的尺寸和数量将起到积极的作用。

3.3 返工重熔对焊接接头质量的影响

图5为重熔与未重熔接头组织对比情况，图6

为返工重熔对接头质量的影响。

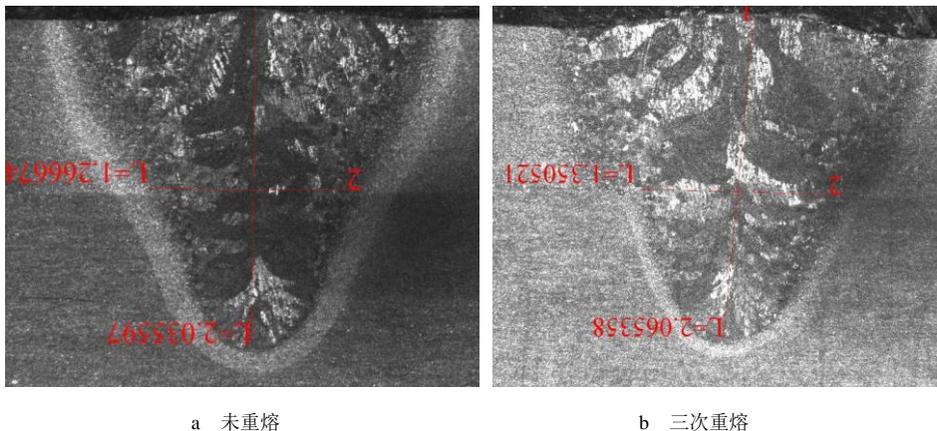


图5 返工重熔接头对比情况

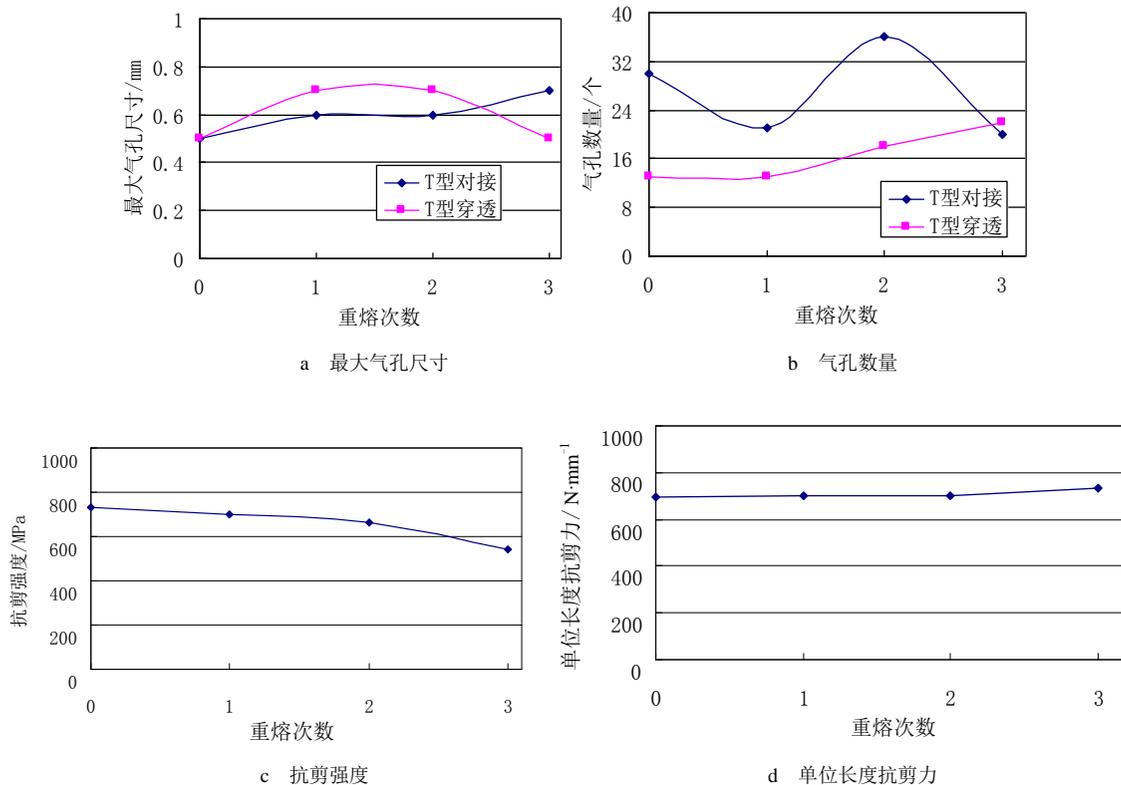


图6 重熔次数对接头质量的影响

从图5中可以看出，三次重熔后焊缝的形态并未发生变化，但熔池和热影响区的晶粒明显粗化，钛合金晶粒粗化必然会引起其力学性能的下降，上下板材的贴合面熔宽随着焊接次数的增加而略有增加。从图6所示的重熔试验结果可以看出，钛合金激光焊中反复重熔对气孔的尺寸和数量没有明显的改善，而接头的力学检测结果显示，随着重熔次数的增加，接头强

度呈现下降趋势。由于多次重熔后焊缝贴合面的熔合宽度有所增加，因此焊缝的单位长度抗剪力并未随着重熔次数的增加而下降。

3.4 焊接接头缺陷对力学性能影响

焊前酸洗、焊接温湿度及焊后重熔试验结果显示，在不同的影响因素下，气孔是钛合金激光焊接接头普遍存在的现象，随着焊接工艺的变化，气孔的尺

寸和数量会出现不同程度的波动。图 7 为上述条件下

焊接接头气孔及力学性能检测结果统计。

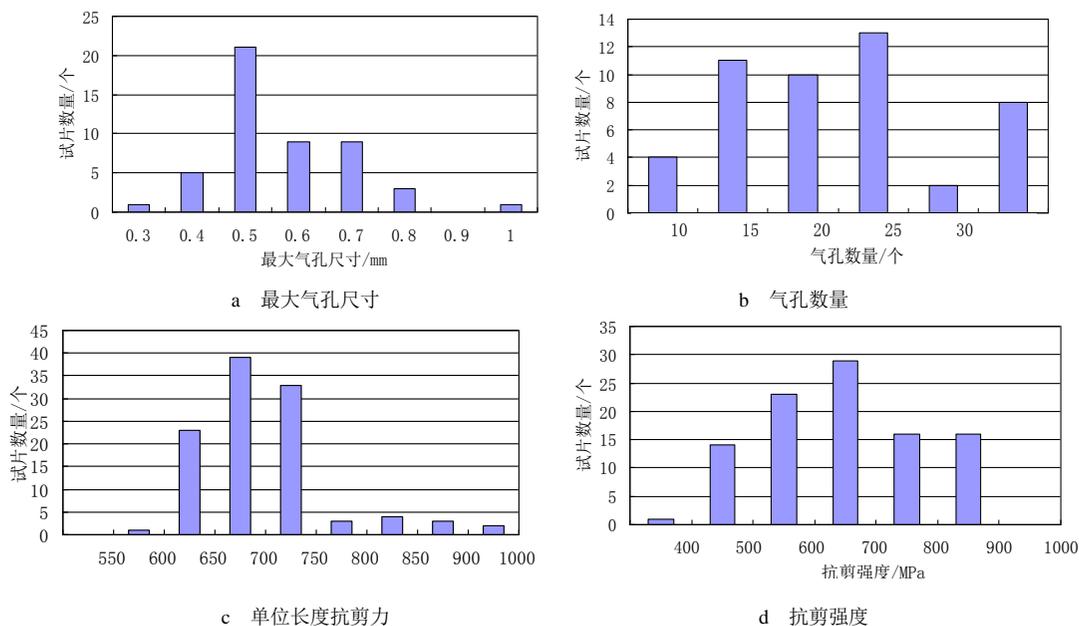


图 7 接头缺陷和力学性能统计

根据图 7 试片质量的统计结果表明,最大气孔尺寸集中在 0.5mm 左右,但个别情况出现了 1mm 的气孔(1 个试片样本),气孔的数量分布范围较广。图 7b 所示结果说明,影响气孔数量的因素较多,在不同焊接条件下气孔数量易出现大范围的波动,实验样本中 100mm 气孔累计数量从 10 个以下到 30 个以上离散分布。从试片的力学性能检测结果可以

看出,试片的单位长度抗剪力主要集中在 600~750N/mm 之间,仅出现一例单位长度抗剪力低于 600N/mm 的试片,实测结果为 595N/mm。而试片的抗剪强度主要分布在 500~700MPa 范围内,部分试片的抗剪强度甚至达到了 900MPa 以上。

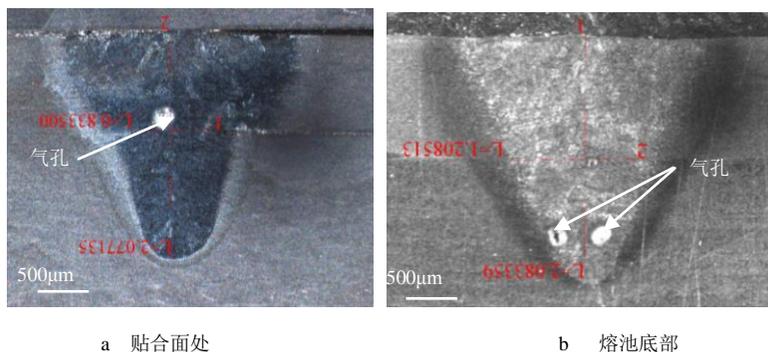


图 8 不同位置处的气孔

试片在力学实验中,断裂部位为上下两侧板材的贴合面部位,因此贴合面的熔宽直接影响了接头的抗剪力。焊缝内处于不同位置的气孔,对接头的抗剪能力影响不同,如图 8 所示。通常下侧板材并非处于主要受力面,该部位的气孔(见图 8b)基本上不影响接头的抗剪能力。而上侧板材内部的气孔

对接头抗剪能力影响也很小,但是由于上端板材厚度小,且完全熔透,若存在较大气孔缺陷,力学实验中试片可能在上侧板材部位以拉伸方式断裂(实验结果中并未出现此种情况)。而处于贴合面处的气孔(见图 8a),由于直接降低了贴合面的有效受

(下转第 28 页)

