

钛合金激光未穿透焊气孔形成的机理研究

杜汉斌¹ 沈剑平¹ 邬美华² 王光耀¹

(1 上海汽车股份有限公司汽车工程研究院,上海 200437)

(2 上海汇众汽车有限公司,上海 200435)

文 摘 针对钛合金激光焊接的气孔问题进行了研究,对不同工艺参数下钛合金自熔激光焊接试样中的气孔数量及分布进行了金相观察,并进行了酸洗试样的对比试验。研究表明:钛合金未穿透激光焊接过程会形成气孔,酸洗对气孔的形成没有明显影响。根据气孔的位置分布及尺寸大小,提出将钛合金激光焊接气孔分为 I 型气孔和 II 型气孔,并阐述了未穿透激光焊接过程中 I 型气孔形成的机理。

关键词 气孔,激光焊接,钛合金

Formation Mechanism of Pores in Partial Penetration Weld for Titanium Alloy

Du Hanbin¹ Shen Jianping¹ Wu Meihua² Wang Guangyao¹

(1 Automotive Engineering Academy of Shanghai Automotive Industry Co., Shanghai 200437)

(2 Shanghai Huizhong Automotive Manufacturing Co., Ltd, Shanghai 200435)

Abstract A study on the porosity of titanium alloys in laser welding is carried out. The microstructures in autogenous laser welding for titanium alloys are examined to determine the distribution locations and quantities of porosity under different technology parameters. In order to examine the effect of the oxide on porosity formation, pickled and unpickled test pieces are prepared for comparison. The results indicate a lot of macro pores exist in the partial penetration weld, and no evident proof indicates that the pickling of the specimen can suppress the pore formation. According to the location and size of the pores, they can be divided to I type and II type of pore. According to the experiment results, the formation mechanism of I type of pore is found out.

Key words Porosity, Laser welding, Titanium alloy

1 引言

钛及其合金具有许多独特的优越性能,在航空航天领域得到广泛的应用。激光加工技术具有能量集中、焊缝成形好及操作简单等优点,非常适合焊接钛合金,但是在焊接时易产生气孔。

研究人员对激光焊接过程中气孔的成因进行了大量研究。Kutsuna^[1]在研究激光焊接铝合金时,发现气孔中体积分数 83%是氢气,8%是氮气,说明气孔的主要成分是保护气体。Matsunawa 等^[2]利用 X

射线高速成像系统观察了激光焊接铝合金气孔的形成过程。雷华东等^[3]研究激光焊接不锈钢时发现,焊缝内部气孔形成的主要原因是从熔池上方和底部卷入空气所致,提出加强正面保护和采用背面止口的办法来消除气孔。张旭东等^[4]提出采用 CO₂ 作为保护气体,以提高熔池中氧含量,解决大熔深激光焊接低碳钢时的气孔问题。目前尚未发现钛合金激光焊接过程气孔研究的相关报道。本文对激光焊接钛合金过程中气孔产生的机理进行研究。

收稿日期:2004-12-20;修回日期:2005-01-17

作者简介:杜汉斌,1972年出生,高级工程师,主要从事激光焊接及切割方面的研究工作

2 试验

2.1 材料

试验用 TC1合金为真空自耗电弧炉熔炼而成,真空电炉退火处理,规格为 100 mm ×100 mm ×1.5 mm。其化学成分及力学性能见表 1。

表 1 TC1化学成分及力学性能

Tab 1 Chemical composition and mechanical properties of TC1

TC1/(% (质量分数))			σ_b /MPa	/%	/(°)
Ti	Al	Mn			
余量	2.0	1.8	750	25	60

2.2 方法

采用 PRC2000快速轴流 CO₂激光器,额定功率 2 kW,模式 TEM01^{*},激光束经铜镜反射后,采用 $f = 125$ mm 的 ZnSn透镜聚焦,聚焦光斑直径 0.2 mm。焊接后进行 X射线探伤,并用扫描电镜及光学显微镜进行金相分析,观察焊缝中气孔分布。

3 结果

从表 2可以看出,对于自熔焊接头,只要接头未焊透,焊缝内部就存在大量气孔;而对于熔透的焊缝,无论其表面是否酸洗、速度快慢,均未发现气孔。

表 2 激光焊接工艺参数及结果

Tab 2 Welding parameters and results

试样编号	表面处理	激光功率 /kW	焊接速度 /m·min ⁻¹	焊接情况	气孔情况
1 [#]	酸洗后风干	1.6	0.5	焊透	无
2 [#]	酸洗后风干	1.6	1.6	焊透	无
3 [#]	酸洗后风干	1.6	2.1	焊透	无
4 [#]	酸洗后风干	1.6	2.7	焊透	无
5 [#]	去油未酸洗	1.6	0.5	焊透	无
6 [#]	去油未酸洗	1.6	1.6	焊透	无
7 [#]	去油未酸洗	1.6	2.1	焊透	无
8 [#]	去油未酸洗	1.6	2.7	焊透	无
9 [#]	酸洗后风干	1.2	2.7	未焊透	100 mm 链状气孔,数量 140,平均孔径为 0.31 mm
10 [#]	酸洗后风干	1.2	3.3	未焊透	100 mm 链状气孔,数量 137,平均孔径为 0.25 mm
11 [#]	酸洗后风干	1.2	3.7	未焊透	100 mm 链状气孔,数量 62,平均孔径为 0.2 mm
12 [#]	酸洗后风干	1.2	4.3	未焊透	100 mm 链状气孔,数量 57,平均孔径为 0.14 mm
13 [#]	去油未酸洗	1.2	2.7	未焊透	100 mm 链状气孔,数量 106,平均孔径为 0.30 mm
14 [#]	去油未酸洗	1.2	3.3	未焊透	100 mm 链状气孔,数量 134,平均孔径为 0.25 mm
15 [#]	去油未酸洗	1.2	3.7	未焊透	100 mm 链状气孔,数量 110,平均孔径为 0.2 mm
16 [#]	去油未酸洗	1.2	4.3	未焊透	无,焊接过程为传热焊

未穿透时,气孔数量的对比见图 1,从图中可以看出,酸洗对于焊缝中气孔的形成无明显影响。

根据气孔的分布和尺寸可分为 型和 型气孔。型气孔的形状不规则,可以明显看到气孔聚合,形成串联或链状气孔,分布在焊缝的中下部,该处焊缝组织形貌为等轴晶,上部为柱状晶,该类气孔较大,直径超过 80 μm,最大的气孔长径达到了 0.7 mm;型气孔的形状近似于球形,其直径约 5~40 μm,只有借助于显微镜才能观察到,该类气孔分布范围较广,在焊缝截面上、下部均可发现。

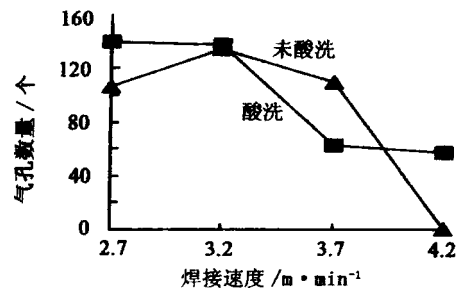
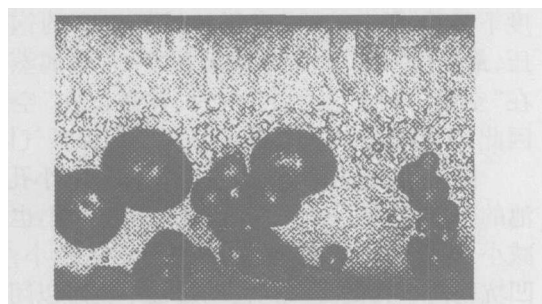


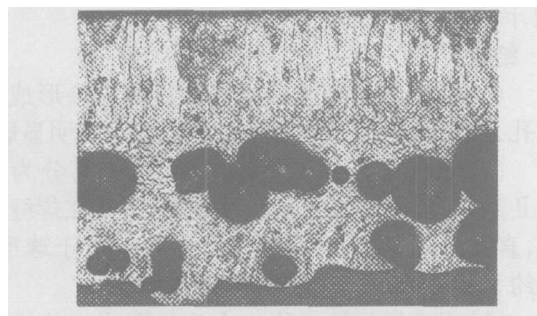
图 1 酸洗与否焊缝中气孔数量对比

Fig 1 Amount of pores in pickled and unpickled test pieces

图 2 为酸洗对气孔在焊缝内分布的影响。



(a) 酸洗 (9#试样)

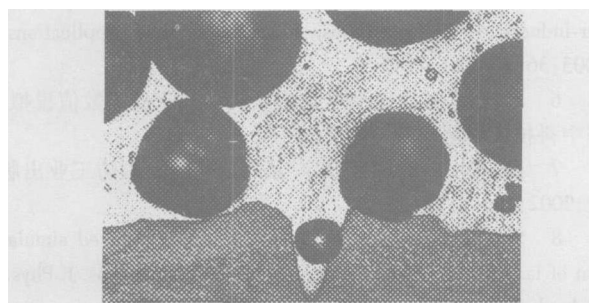


(b) 未酸洗 (13#试样)

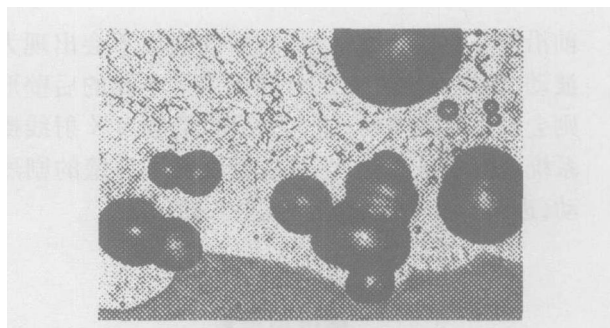
图 2 酸洗对施焊后焊缝纵剖面的气孔分布的影响 50 ×
Fig 2 Pores distribution in longitudinal section of pickled and unpickled testpieces

从图 2(b)可以看出,未酸洗试样焊接后,焊缝中 型气孔数量明显超过酸洗后施焊的试样,焊缝中还可以观察到表面氧化层卷入形成的氧化物杂质,说明 型气孔形成很可能与焊缝表面氧化物中含有的氢氧元素有关。由于此类气孔为球形,且直径很小,不会造成应力集中^[5],因此对接头质量的影响很小。需要指出的是,尽管酸洗对焊缝中 型气孔的形成并没有明显的影响,但为了消除焊缝中氧化物杂质对接头的影响,试样在焊接前必须酸洗。

图 3 为 9#试样焊缝中下部气孔分布图。



(a) 沟槽位置



(b) 凹坑位置

图 3 9#试样纵剖面气孔分布 100 ×
Fig 3 Pores distribution in longitudinal section of Na 9 specimen

从图 3(a)可以看出:在熔深波动较大的位置,焊缝中有沟槽,被沟槽壁吸附的气孔很难逸出,陷在熔池内;图 3(b)中熔深突变形成的凹坑处也聚集了 型气孔。

4 型气孔的形成机理分析

通过数值方法研究了激光焊接过程中的温度场及流动场,获得了激光焊接准稳态过程的小孔形貌,当激光功率为 1.6 kW,焊接速度 2.7 m/min 时,焊接熔池纵剖面小孔形貌如图 4 所示^[6]。

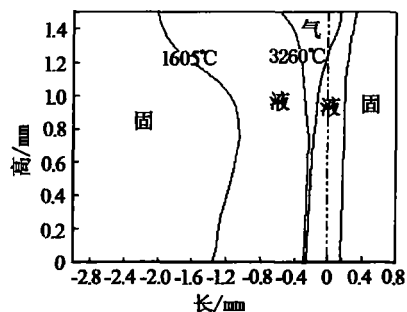


图 4 焊接熔池纵剖面小孔形貌

Fig 4 Keyhole profile in longitudinal section of weld

从图 4 可以看出,熔池中的小孔不是垂直于焊缝表面,而是沿焊接速度相反方向发生倾斜;小孔孔径沿板厚方向也不断变化,在熔池的上表面小孔直径约 0.3 mm,在焊缝底部,小孔直径约 0.04 mm。随着焊接速度的增大,小孔的倾斜角越大,小孔的直径越小。

以上计算未考虑保护气体对小孔形貌的影响。实际焊接中,保护气体的压力会破坏小孔壁面的局部平衡,由图 4 可知,小孔前沿熔池的厚度仅为 0.3 mm,而后壁熔池的厚度为 1.6 mm 左右,由于小孔

前沿液态金属壁面很薄,前沿的壁面不会出现大的波动,而在保护气体压力的作用下小孔的后壁形状则会发生剧烈波动,图5所示的模型为X射线摄像系统观察结果的放大,该模型证实了后壁的剧烈波动,进而导致小孔后壁出现很大的凹坑^[2]。

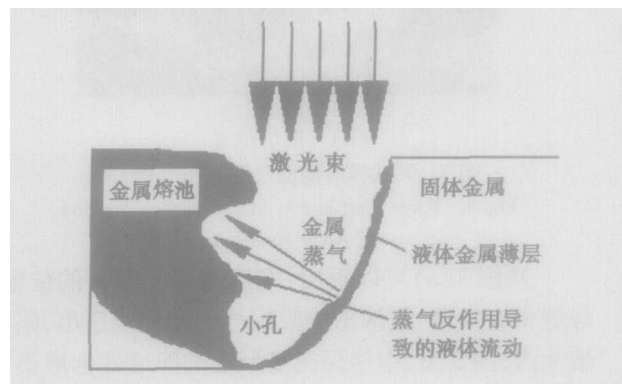


图5 Matsunawa的小孔后壁凹坑形成模型^[2]

Fig 5 Model of concave formation at behind of keyhole developed by Matsunawa

激光束作用在小孔前沿上,小孔前沿的金属受激光的辐照产生大量金属蒸气,并会向外喷射,反冲形成的蒸气压可以表示为^[7]

$$P = \frac{A I_0 \sqrt{R_g T_v / a}}{L_v + C_q T_v} \quad (1)$$

式中, R_g 为气体常数, a 为金属蒸气的摩尔质量, T_v 是金属蒸气的气化温度, A 为材料对激光的吸收率, I_0 为入射激光的能量密度, L_v 为金属蒸气的气化潜热, C_q 为金属气化温度的定压比热容。

经计算,钛合金金属蒸气对小孔底部形成的压力为 $1.05P_0$ (P_0 为大气压), Sundik^[8] 通过数值方法计算的铝合金小孔内部的金属蒸气压为 $1.08P_0$, 而焊接保护气体的压力为 $1.1 \sim 1.2 P_0$, 超过了金属蒸气压, 所以部分保护气体进入小孔在理论上是完全可能的, 且已为 Matsunawa^[2] 等证实。气体进入小孔, 势必破坏小孔壁面上的压力平衡, 造成小孔后壁上形成凹坑。

随着工件的移动, 小孔随之移动; 但由于小孔后壁金属液体的波动, 凹坑朝小孔方向的开口很容易闭合, 从而在熔池金属内部形成封闭的“空腔”。在表面张力作用下, “空腔”有收缩为球状的趋势, 当“空腔”为长条状时, “空腔”会逐段收缩为若干球形串接, 这也是链状气孔形成的原因。

由于“空腔”内部充满金属蒸气, 不会自行闭合, 而是与熔池金属一起流动。熔化金属迅速凝固,

而位于“空腔”内部的金属蒸气由于其热导率小, 温度下降很慢, “空腔”内仍然维持很高的饱和蒸气压, 最后“空腔”内的金属缓慢冷却, 金属蒸气凝结在“空腔”内壁上, 剩余保护气体残留在“空腔”中, 因此, 型气孔内部气体成分主要为保护气体。

随着焊接速度提高, 小孔孔径减小, 小孔后壁熔池的厚度也随之减小, 所形成的凹坑大小也要随之减小, 因此气孔的孔径减小; 由于凹坑减小, 相应的凹坑朝向小孔的开口在移动过程中就难以闭合形成气孔; 小孔后拖量越大, 保护气体深入小孔底部越困难, 因此气孔率也随之下降。

5 结论

(1) 钛合金未穿透激光焊接过程中会形成大量气孔, 酸洗及焊接速度对气孔的形成没有明显影响。

(2) 根据气孔的位置和尺寸, 可将其分为 型和 型气孔, 型气孔形状不规则, 分布在焊缝中下部, 直径超过 $80 \mu\text{m}$; 型气孔形状近似于球形, 直径约 $5 \sim 40 \mu\text{m}$, 分布在整个焊缝截面。

(3) 未穿透焊接过程中 型气孔形成的机理是保护气体进入小孔, 破坏了小孔后壁的局部平衡, 形成小孔后壁上的凹坑; 随着工件的运动, 凹坑朝向小孔的开口闭合形成“空腔”, 底部小孔随着熔深的波动也很容易闭合形成“空腔”; 下部“空腔”在熔池金属中形成气泡, 气泡凝固过程中形成气孔。

参考文献

- 1 Kutsuna M, Suzuki J, Suqiyama S et al CO₂ laser welding of A2219, A5083 and A6063 aluminium alloys Welding in the World, 1993; 31 (2): 126 ~ 135
- 2 Matsunawa A, Katayama S Understanding physical mechanisms in laser welding for construction of mathematical model Welding in the World, 2002; 46 (7): 27 ~ 38
- 3 雷华东, 黄文荣, 郭鹏等. 抗氢不锈钢的激光焊接性及气孔成因初探. 焊接技术, 2002; 30 (8): 8 ~ 10
- 4 张旭东, 陈武柱, 芦田荣次等. CO₂ 气体保护的激光焊接 12mm 厚低碳钢板. 焊接学报, 2002; 23 (6): 51 ~ 54
- 5 Cho M H, Farson D F, Kim J I Control of chaos in laser-induced vapor capillaries Journal of Laser Applications, 2003; 36 (8): 161 ~ 167
- 6 杜汉斌. 钛合金激光焊接及其熔池流动场数值模拟. 华中科技大学博士学位论文, 2004
- 7 孙承纬. 激光辐照效应. 第一版. 北京: 国防工业出版社, 2002: 155 ~ 178
- 8 Sundik W, Radaj D, Erofeev W. Computerized simulation of laser beam weld formation comprising joint gaps J. Phys D: Appl Phys, 1998; 31 (24): 3 475 ~ 3 480

(编辑 吴坚)

宇航材料工艺 2006年 第3期