

铝合金 CO₂ 激光与 TIG 薄板焊接接头力学性能分析

周清林, 乔及森, 陈剑虹, 朱 亮

(兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050)



周清林

摘 要: 对铝合金 5A02 薄板本身的力学性能、CO₂ 激光焊接与 TIG 焊接两种焊接方法的铝合金薄板焊接接头的力学性能进行了测定, 并对轧制方向与垂直轧制方向的力学性能进行了测定。另外采用系列加载试验对焊缝、母材的性能进行了研究。结果表明, 材料的各向异性影响焊接接头的性能, 焊接接头的力学性能与各个区域的性能存在一定的关系, 为焊缝的表征提供了理论依据, 为铝合金的汽车构件碰撞模拟提供局部力学性能的试验数据。

关键词: CO₂ 激光焊接; TIG 焊接; 焊接接头; 各向异性; 曲线拟合

中图分类号: TG146 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2006)08-063-04

0 序 言

在汽车制造中, 为了提高汽车车架的刚度, 减轻汽车的重量, 提高汽车的碰撞性能, 大量使用铝合金材料。随着全铝车身汽车的使用, 铝合金薄板焊接结构在汽车中起着越来越重要的作用, 因此研究铝合金薄板焊接接头的强度、硬度等性能十分必要。铝合金的薄板焊接是指用平板材料焊接在一起而形成的平板坯料, 其焊接方式通常有激光焊接、缝焊、离子束焊接、搅拌摩擦焊接、感应焊、TIG 焊接^[1], 特点是在零件中获得好的使用性能, 并且满足汽车的结构设计要求。但是对于铝合金薄板的焊接接头的力学性能由于焊缝、热影响区、母材之间有着不可预测的联系, 所以国内外都进行了一系列的研究, 西安交通大学史耀武^[2]等对焊接接头的力学性能提出了微剪韧性的概念, 为微接头的局部力学性能的测定提供了很好的依据; 作者结合材料本身的各向异性对接头的性能进行了研究, 并对焊接接头的母材、焊缝的性能做了系列试验, 提出了两个区的拉伸性能拟和关系式, 为以后汽车部件的碰撞模拟焊缝的表征提供试验数据。

1 试验与分析

1.1 材料与试样

采用通常的薄板拉伸试验, 对母材与焊接接头

的性能进行测定, 由于拉伸试验所测定的是均质材料, 但是带有焊接接头的试样很明显不是均质的, 把接头看成是由焊缝、热影响区和母材三部分组成。焊缝的材料属性可以通过横向拉伸试验测定, 但是由于热影响区的区域很小, 没有合适的试验来测定其材料参数。结合实际对 CO₂ 激光焊与 TIG 焊接接头进行拉伸试验, 并且用所得的材料参数对焊缝与加载方向相同的拉伸试验做了进一步的分析。材料力学性能的影响因素很多, 金相组织、组织结构^[3]是影响材料力学性能的主要因素, 因此对材料的金相组织和 X 射线衍射进行研究也成为材料表征的一个不可缺少的部分。选用的材料为广泛应用于汽车外壳的铝合金材料 LF2(5A02), 其材料化学成分(质量分数, %)除铝外, 还有 Si 0.25, Fe 0.4, Cu 0.1, Mn 0.1, Mg 2.7, Cr 0.15 ~ 0.35, Zn 0.1, 其它杂质每种含量少于 0.05, 总量少于 0.15^[4]。由于在汽车的外壳中大量运用 LF2(5A02) 薄板, 因此选用厚度 $\delta = 1.0 \text{ mm}$ 的铝镁硅合金作为研究对象。首先对母材的力学性能进行了测定, 试样尺寸如图 1 所示。

2 试验结果与讨论

2.1 金相分析与 X 射线衍射分析

由于铝合金的焊接与钢的焊接有共同的特点, 当附合能量条件时, 焊接熔池在运动状态结晶, 熔池过热程度很大, 冷却速度快, 过冷明显, 因此在焊接过程中形成很明显的三种凝固组织形态, 平滑界面、胞状晶、树枝晶^[5]。另外铝合金的焊接由于容易从

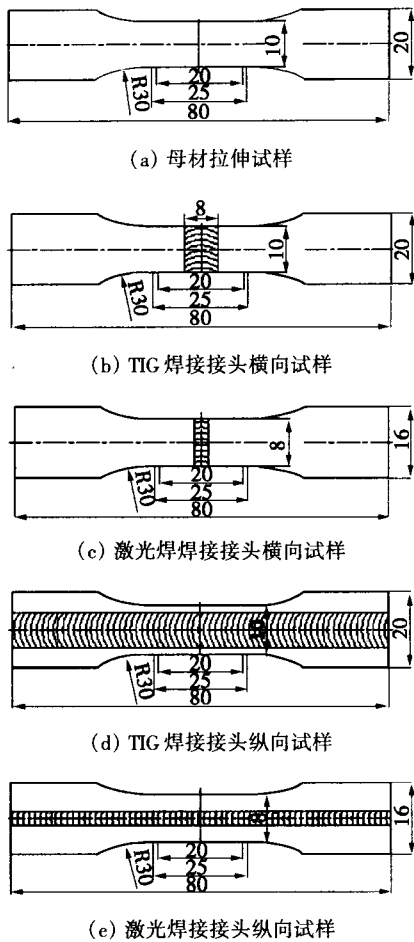
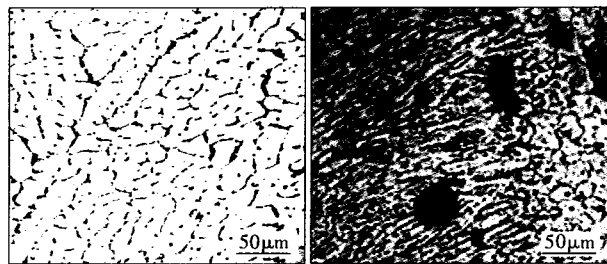


图 1 母材与焊接接头拉伸试样(mm)

Fig.1 Specimen of base metal and welded joint for tensile test

空气中吸收更多的气体,而气体又在快速冷却过程中不能及时逸出,最终在焊缝中形成气孔,如图 2 所示。



(a) 母材组织 (b) 熔合区组织

图 2 Al 5A02 母材与焊接接头金相图

Fig.2 Microstructure of base metal and welded joint

从图上来看 TIG 焊接和激光焊接有很大的不同,激光焊接由于焊接速度明显比 TIG 焊接快,冷却过程迅速,更加容易形成气孔;另外热影响区较小,相反 TIG 焊接的热影响区很大,因此激光焊接是一种焊接铝合金前景很好的焊接方法,特别是对于薄

板的焊接。由于焊接接头的力学性能和母材相差甚远,根据试验的需要,对焊缝与母材的 X 射线衍射图谱进行了比较。选用了 TIG 焊接的焊缝与母材作为 X 射线衍射试验的对象,试验结果如图 3 所示。从图谱上来看,焊缝与母材出现峰值的扫描角度基本上一致,而且形成的相的成分主要都是 $Al_{13}Si_{0.47}$,焊缝也没有其它的相生成。前两个峰值强度母材要明显高于焊缝,峰宽相差不大,而后两个峰值恰好相反,而且焊缝峰宽是母材的 1.5~2 倍,而峰宽与晶体大小有关,可以看出焊缝没有生成其它降低材料强度的软质相,只在某些区域晶粒比母材要粗大,即焊缝的晶粒存在严重的不均匀性,有些区域的晶粒大大超过了母材,从而造成焊缝的强度与韧性降低。因此在焊接过程中合理的调整工艺参数,细化焊缝的晶粒,提高焊接接头的强度与韧性,达到等匹配是焊接研究的一个重要部分。

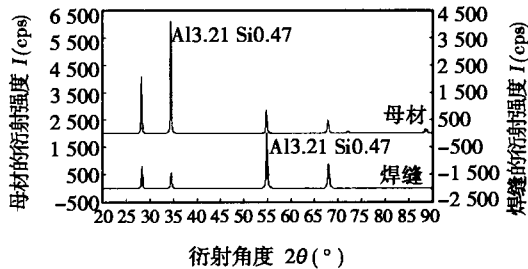


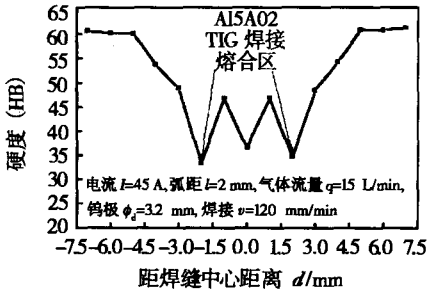
图 3 焊缝与母材的 X 射线衍射图谱

Fig.3 X-ray diffraction pattern of base metal and weld bead

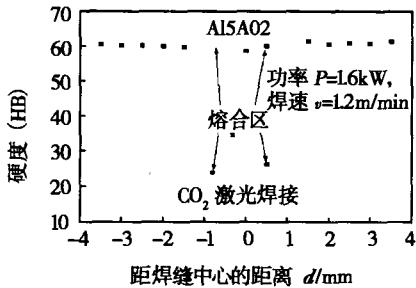
2.2 焊接接头的硬度分析

焊接方法的不同,铝合金焊缝的硬度也不同,比较 Al5A02 的焊接,分别采用 TIG 焊接与 CO_2 激光焊接,焊缝的性能有很大的差别,如图 4a, b 分别是 Al5A02 的激光焊接和 TIG 焊接接头的布氏硬度分布图。

从图可以看出 TIG 焊接由于热输入相对激光焊接比较分散,而且冷却过程比较慢,影响区域大,特别是热影响区的硬度特别低,在熔合区附近硬度只有母材的一半;而激光焊接热输入集中,对母材影响比较小,在焊缝区硬度也没有明显的变化,但是激光焊接的硬度在熔合区还要低,这主要是在焊接过程中更加容易形成气孔,另外没有添加焊接材料而使熔合区得不到补充造成硬度低,是力学性能试验中强度反而比 TIG 焊接更低的主要原因。如果合理地控制工艺,特别是控制气孔的形核,激光焊接接头可以达到与母材同样的强度,甚至有可能更高的强度;而 TIG 作为应用更为广泛的焊接方法,对其进行研究,提高焊接接头的强度也是有必要的。



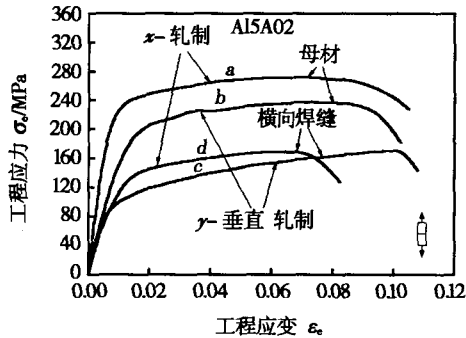
(a) TIG 焊接接头的硬度分布



(b) CO₂ 激光焊接接头的硬度分布

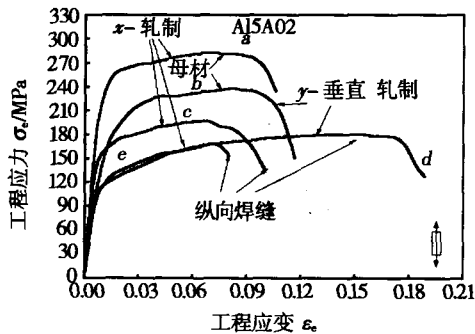
图 4 焊接接头硬度分布图

Fig.4 Hardness distributions of TIG welded-joint and CO₂ laser-welded-joint



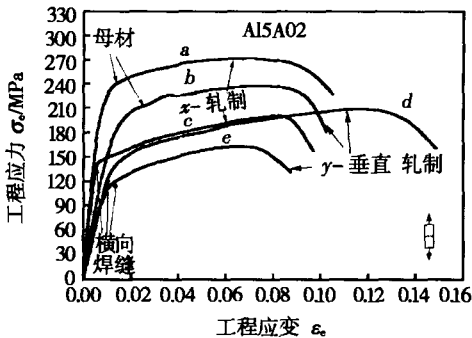
功率 $P = 1.6 \text{ kW}$, 焊速 $v = 1.2 \text{ m/min}$

(a) CO₂ 激光焊接接头试样



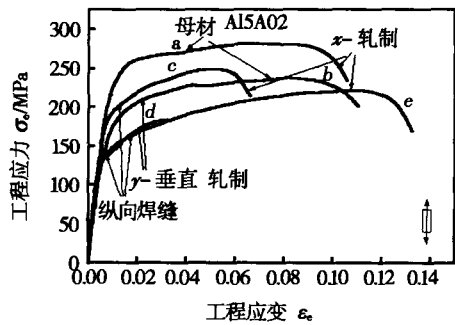
曲线 d : 功率 $P = 1.6 \text{ kW}$, 焊速 $v = 1.2 \text{ m/min}$; 曲线 c, e : 功率 $P = 1.5 \text{ kW}$, 焊速 $v = 1.3 \text{ m/min}$

(c) CO₂ 激光焊接接头纵向试样



曲线 c, d : 电流 $I = 40 \text{ A}$, 弧距 $l = 2 \text{ mm}$, 气体流量 $q = 15 \text{ L/min}$, 钨极 $\phi_d = 2.52 \text{ mm}$, 焊速 $v = 132 \text{ mm/min}$; 曲线 e : 电流 $I = 45 \text{ A}$, 弧距 $l = 2 \text{ mm}$, 气体流量 $q = 15 \text{ L/min}$, 钨极 $\phi_d = 3.2 \text{ mm}$, 焊速 $v = 120 \text{ mm/min}$

(b) TIG 焊接接头试样



曲线 c, d : 电流 $I = 45 \text{ A}$, 弧距 $l = 2 \text{ mm}$, 气体流量 $q = 15 \text{ L/min}$, 钨极 $\phi_d = 2.5 \text{ mm}$, 焊速 $v = 120 \text{ mm/min}$; 曲线 e : 电流 $I = 40 \text{ A}$, 弧距 $l = 2 \text{ mm}$, 气体流量 $q = 15 \text{ L/min}$, 钨极 $\phi_d = 3.2 \text{ mm}$, 焊速 $v = 132 \text{ mm/min}$

(d) TIG 焊接接头纵向试样

图 5 CO₂ 激光焊接和 TIG 焊接接头拉伸试样应力—应变曲线

Fig.5 Stress – strain curves of CO₂ laser welded joint and TIG welded joint in tensile tests

2.3 焊接接头的力学性能分析

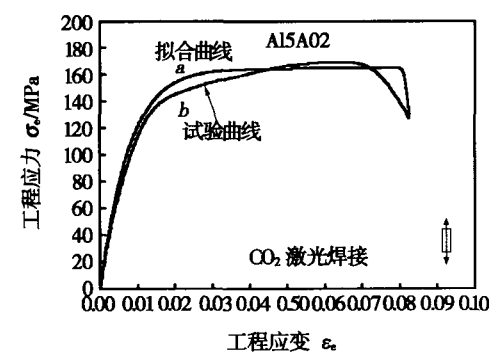
铝合金薄板焊接在汽车工业中越来越重要,因此研究铝合金焊接接头的力学性能是十分必要的。从图 5 可以看出母材的力学性能也呈现出各向异性,在轧制方向强度比垂直轧制方向的性能要好,通常在薄板的加工过程中由于轧制过程造成了材料本身的各向异性。从图 5a 中可以看出,同一工艺参数的情况下,轧制方向 c 曲线强度比 d 曲线代表的焊缝性能要高,同样在图 5b 中相同工艺条件下,母材的方向性也影响焊缝的强度,但是在不同工艺条件下材料的强度可以得到提高,如图 5b, c, d 中的曲线 c 就是很好的解释。因此合理调整工艺参数可以避免材料的各向异性带来的不足。图 5 表明焊缝的强度明显比母材低,焊缝的屈服强度无论在那个方向焊接与加载都有所下降,但是在轧制方向焊接并在同方向加载,材料的抗拉强度要明显高于在其它方向加载,另外从图 5 可以看出,激光焊接接头的强度要比 TIG 焊接低,这是由于在激光焊接过程中形成气孔所致。因此结合材料的各向异性对选择薄板的

焊接方向、受力方向、合理的设计焊接工艺,是工业设计中应该注意的问题。在加载过程中焊缝、母材的应变与试样的应变相等,即 $\epsilon = \epsilon_{\text{base}} = \epsilon_{\text{weld}}$, 设焊缝的宽度为 b_2 , 母材的宽度为 b_1 , 焊缝受力: $F_{\text{weld}} = \sigma_{\text{weld}} b_2$, $F_{\text{base}} = \sigma_{\text{base}} b_1$, $F_{\text{total}} = \sigma_{\text{total}} (b_1 + b_2)$, 最终得到纵向拉伸试验的拟合表达式为

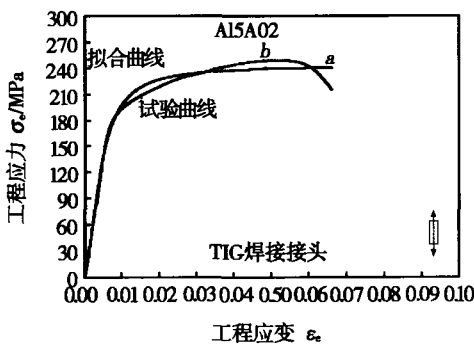
$$\sigma_{\text{total}} = \frac{\sigma_{\text{base}} b_1 + \sigma_{\text{weld}} b_2}{b_1 + b_2}, \quad (1)$$

式中: σ_{total} 为试样受的总应力; σ_{weld} 为焊缝部分所受应力; σ_{base} 为母材部分所受应力; F_{base} 为母材部分承受的力; F_{weld} 为焊缝部分承受的力; F_{total} 为整个试样承受力。

图 6 为拟合式与试验数据结果的对照。



(a) 激光焊接纵向试验应力应变曲线与拟合结果比较



(b) TIG 纵向试验应力应变曲线与拟合结果比较

图 6 薄板焊接的纵向拉伸试验应力-应变曲线与拟合曲线比较图

Fig.6 Comparison between experimental tensile stress-strain curve and its fitting result

从图看出试验结果与拟合结果基本上吻合,但是由于没有考虑热影响区和各个区的相互影响,因此还有一定的差别。

3 结 论

- (1) 焊接薄板对接接头的性能研究主要由金相组织、焊缝区硬度、X 射线衍射以及力学性能等各个部分组成,因此对薄板对接接头各种性能的研究都是有必要的。
- (2) X 射线衍射表明,材料通过焊接以后一般情况下是不会改变焊缝的组织成分的。
- (3) 焊接薄板对接接头的力学性能和母材有必然的联系,研究其联系对于合理的选择焊接工艺,以及板材的应用有重要意义。
- (4) 焊接薄板对接接头的试验与拟合表明,不同材料自身的力学性能与其焊缝和母材的力学性能存在必然的联系。

参考文献:

[1] Pallett R J, R J. The use of tailored blanks in the manufacture of construction components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001(2): 249 - 254.

[2] 史耀武,周宁宁,张新平,等. 微剪切实验及对焊接接头力学性能的评价[J]. 焊接学报, 1994, 15(4): 235 - 240.

[3] 周 玉,武高辉. 材料分析测试技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1998.

[4] 武 恭,姚良均. 铝及铝合金材料手册[M]. 北京:北京科学出版社, 1994.

[5] 吕德林,李砚珠. 焊接金相分析[M]. 北京:机械工业出版社, 1986.

作者简介:周清林,男,1978 年 7 月出生,硕士研究生。研究方向为带有焊接接头的铝合金材料性能表征方法研究;剪裁拼焊板制成的基本单元载静动载下的变形破坏过程研究,发表论文 2 篇。

Email: zhouql _ _ lut@126.com