

Al 合金接触反应钎焊接头力学响应及中间层厚度的确定

董占贵¹, 钱乙余¹, 石素琴¹, 吴培莲²

(1. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨150001; 2. 哈尔滨工业大学 分析测试中心, 哈尔滨150001)

摘要: 接触反应钎焊是目前常用的材料连接方法。为了合理选择中间层材料的厚度, 本文以Si作中间层接触反应钎焊LF21铝合金为例, 采用有限元(FEM)模拟的办法, 对不同宽度的钎缝对外加拉伸载荷的力学响应过程进行了数值模拟。结果表明, 钎缝对外载荷的力学响应的应力集中区位于接头表面的钎缝与基体的界面处; 且最大应力值与外载荷呈线性关系。即钎缝对外载荷的力学响应的实质是对外载荷的线性放大, 因此本文将此放大系数定义为钎缝的力学响应因子。随着钎缝宽度的增加, 其力学响应因子增大, 钎缝的承载能力降低。在试验证明FEM计算结果的可靠性的基础上, 给出了Si为中间层进行LF21铝合金接触反应钎焊时, 其合适的钎缝宽度范围是50~80 μm 。最后本文根据相图对相应的Si中间层厚度进行了理论计算, 得到Si中间层的厚度范围为6.6~10.0 μm 。



董占贵

关键词: 接触反应钎焊; 有限元数值模拟; 钎缝力学响应因子; 中间层厚度计算

中图分类号: TG457.14

文献标识码: A

文章编号: 0253-360X(2002)01-34-04

0 序言

从原理上讲, 接触反应钎焊(CRB)依靠材料间的冶金反应(如共晶反应)产生液相来实现材料的连接[1], 目前该工艺已被应用于陶瓷[2,3]、金属间化合物[4]、复合材料[5,6]等多种材料的连接中。为了控制钎焊过程中产生的液相量, 通常在钎焊中普遍采用中间夹层的接头形式, 这样液相总量以中间层的厚度来确定。为此中间层的厚度是接触反应钎焊中要求考虑的重要参数之一, 中间层太厚, 生成液相太多, 对母材溶蚀严重; 太薄, 则液相量小, 难以得到致密、牢固的接头。而采用试验的方法确定中间层的厚度是一个繁琐的过程, 因此本文以Si作中间层接触反应钎焊LF21铝合金为例, 采用有限元方法模拟了不同宽度的钎缝对外加拉伸载荷的力学响应过程, 确定了最佳的钎缝宽度范围; 并根据相图对相应的Si中间层厚度进行了理论计算和选择。

1 有限元模型

假定Al合金接触反应钎焊钎缝抗拉强度试验试件为10mm \times 50mm的棒形试样, 两侧为基体LF21铝合金; 中间是Al-Si合金钎缝, 在接触反应条件下其成分为近共晶成分[7]。从试件尺寸分析, 外加拉伸载荷在接头附近为均匀载荷, 而且试件显然是轴对称的。因此建立图1所示的二维FEM网格模型, 采用4节点等参单元, 计算中钎缝宽度在10~150 μm 变化, 因此FEM单元格划分也随之增加, 对于10 μm 宽的钎缝, 网格为2900个单元, 2955个节点; 最后150 μm 宽的钎缝时, 由于钎缝区网格细分, 因此单元总数增加到4180个, 相应的节

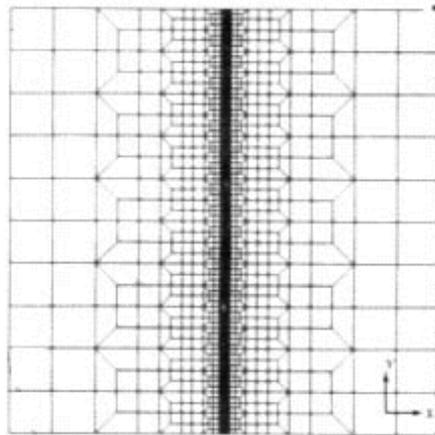


图1 钎缝抗拉强度试件二维有限元网格
Fig.1 Two-dimensional finite element model
of tensile strength test sample

有限元数值模拟软件为商用非线性有限元程序包MARC.2000, 基体及钎缝材料均假设为线弹性, 计算中涉及到的材料常数如表1[8]所示。拉伸过程的FEM模拟计算中, 所用边界条件为模型左边固定; 右边加均匀拉伸载荷, 且载荷随时间由0~100 MPa变化。在此, 考虑到LF21铝合金的屈服强度仅为42MPa, 为充分反映基体屈服对接头界面应力响应的影响, 特别地降低40~50MPa区间内的外加拉伸载荷的加载速率, 整个加载过程如图2所示。

Table 1 Material parameters used in FEM calculation

Material	Elastic modulus E/MPa	Poisson's ratio ν	Yield strength σ_s/MPa
LF21	70 000	0.33	42
Al-Si eutectic	79 000	0.33	189

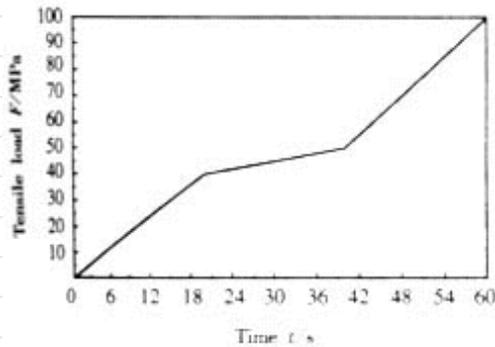


图2 计算中所采用的拉伸载荷
Fig.2 Tensile load used in simulation

2 钎缝界面对外加载荷的力学响应

FEM计算结果表明,钎焊接头在靠近其表面的区域内对外载荷有明显的力学响应—钎缝及其界面处的应力集中。图3是不同时刻,宽度为 $10\ \mu m$ 的钎缝界面处对拉伸载荷的力学响应过程的宏观应力等值分布图。可见在外加拉伸载荷作用下,随着外载荷的增加接头应力集中区的最大应力值呈线性增加。图4是不同宽度的钎缝对同一外载荷下的响应,当钎缝宽度变化时,接头力学响应也明显发生变化:应力集中趋势越来越明显;且在分布区域由窄钎缝下的界面区变成了宽钎缝下的界面和钎缝区。图5给出了不同钎缝宽度下,界面应力集中区最大应力与外载荷的响应情况及其拟合的结果,其中符号点为计算值;直线为对计算值的拟合。可见钎缝界面处对外载荷的响应本质是将其进行了线性放大。在此将图中各直线的斜率(对外力的放大倍数)定义为钎焊接头的力学响应因子,简称力学响应因子 Fr 。显然 Fr 直接反映接头的承载能力—强度: Fr 越大,外载荷被放大的程度就越高,这样接头的承载能力就越弱。

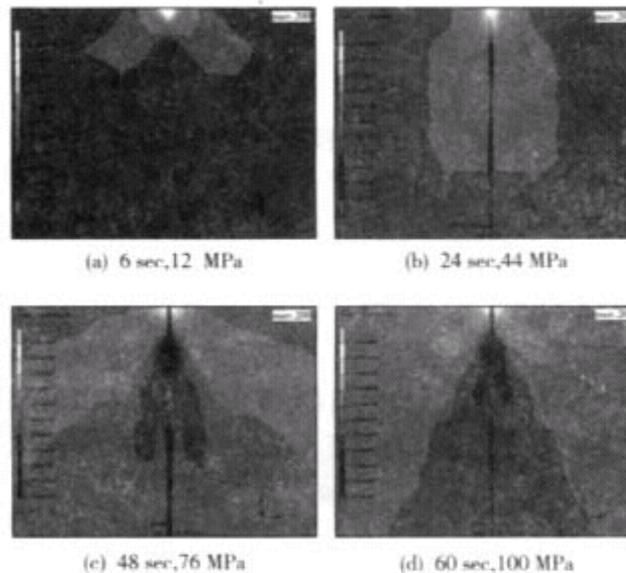


图3 $10\ \mu m$ 宽钎缝界面应力对拉伸载荷的响应过程
Fig.3 Responding process of brazed joint interface with $10\ \mu m$ width to tensile load

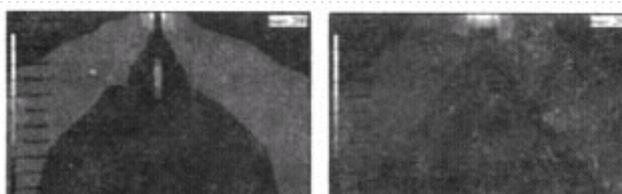




图4 不同宽度的钎缝对外载荷的响应应力分布
(48 sec, 76 MPa)

Fig.4 Stress contours near the brazed fillet interface with different width

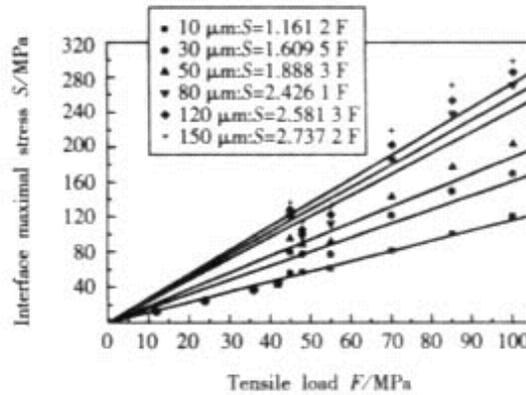


图5 不同宽度的钎缝截面最大应力与外载荷的响应关系

Fig.5 Relationship between tensile load and maximal interfacial stress of brazed seam with different width

3 LF21铝合金接触反应钎焊及钎缝强度试验

为了验证以上FEM模拟计算的可靠性，采用Si粉作中间层进行LF21铝合金的接触反应钎焊，同时测定钎缝的抗拉强度。钎焊试件为58mm×25mm棒料对接，中间层Si的加入量为15~50g/m²(折合厚度为6.44~21.5μm)，这样就可以得到具有不同钎缝宽度的接头。钎焊在真空环境下完成，钎焊温度600℃，保温时间15min，压力0.5MPa。最后将钎焊好的试件加工成拉伸试件，并在电子万能试验机上进行拉伸试验。

图6是典型接头及其断口的组织分析试件进行截面组织分析，钎缝平均宽度为50μm，拉伸试件断在钎缝及界面处。试验结果表明钎缝界面处的是力学敏感区域，图7是试验测得的钎缝宽度 WL与其抗拉强度σ_b的关系。10μm宽的钎缝，其平均抗拉强度为116.1MPa，几乎与基体强度相同(117MPa)；当钎缝增至150μm时，其强度仅为67.2MPa。可见，对应由图7中的结果得到的Fr与钎缝宽度的关系，σ_b、Fr随WL的变化趋势有良好的匹配关系—钎缝宽度增加，Fr增大；钎缝强度降低。

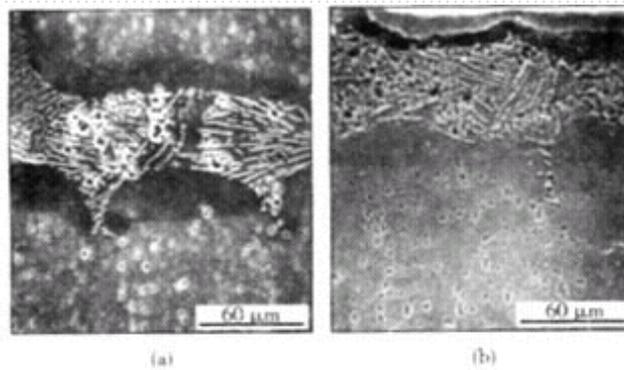


图6 钎焊接头及拉伸试件截面组织分析

Fig.6 Microstructure of CRB joint and tensile test piece

以上试验事实充分证明了前面FEM模拟的可靠性。而且由图7的结果可以得出，对于Si为中间层进行的Al合金接触反应钎焊接头而言，为保证接头的连接强度，要求钎缝宽度不超过80μm。同时考虑到传统钎焊中自然间隙下钎缝宽度为50~150μm，因此认为采用Si作中间层进行Al接触反应钎焊时，钎缝宽度应该控制在50~80μm的范围内。

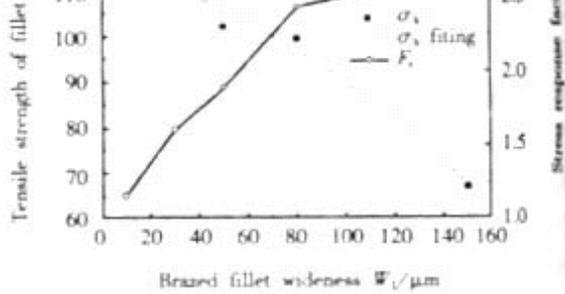


图7 力学响应因子、强度和钎缝宽度的关系
Fig.7 Relationship between F_r , σ_b and W_L

4 Si中间层厚度的确定

按照接触反应钎焊钎缝组织是共晶体进行计算，就可以得出初始厚度为 W_0 的中间层M接触反应钎焊Al时，所能产生

$$W_L = \left(1 + K \frac{md_M}{md_{Al}}\right) W_0, \quad (1)$$

钎缝的宽度 W_L 为

式中： K 为共晶体中铝基体与中间层材料的原子百分比之比； md_M 为中间层材料的体积摩尔数； md_{Al} 为铝的体积摩尔数。

$$md = \frac{\rho}{m'}, \quad (2)$$

所谓体积摩尔数，就是单位体积内所包含的物质的量，即

式中： md 为体积摩尔数（moles/cm³）； ρ 为物质密度（g/cm³）； m' 为摩尔质量（g/mole）。

根据Al、Si及各自物理参数，可以得到二者的体积摩尔数分别为0.01、0.083 moles/cm³。由Al-Si共晶体中Si的原子百分含量为11.2%，因此式(1)中 K 值为7.93。最后可得出钎缝宽度 W_L 与所选Si中间层厚度 W_{Si} 的关系为

$$W_L = 7.57 W_{Si}$$

结合前面的计算结果，用Si作为中间层进行Al的接触反应钎焊时，为保证接头的连接强度，中间层材料的厚度应在6.6~10.1 μm 的范围内。

5 结论

(1) 钎焊接头对外载荷的力学响应的应力集中区位于钎缝与基体的界面处；且最大应力值与外载荷呈线性关系。即钎缝对外载荷的力学响应的实质是将其进行了线性放大。

(2) 随着钎缝宽度增加，其力学响应因子 F_r 增大；钎缝的承载能力降低。对于以Si为中间层得到的LF21铝合金接触反应钎焊接头而言，试验测得的钎缝宽度由10 μm 增至150 μm 时，其抗拉强度相应地由116.1MPa降至67.2MPa。因此为保证接头的连接强度，钎缝宽度的理想范围是50~80 μm 。

(3) 根据相图对相应的Si中间层厚度进行了理论计算，得到合适的Si中间层的厚度范围为6.6~10.0 μm 。

参考文献：

- [1] 邹僖. 钎焊 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [2] Wu Y C. Eutectic bonding of nickel to yttria stabilized zirconia [J]. Journal of Materials Science Letters, 1990, 9(5): 583~586.
- [3] Jankowski A F, Hayes J P. Eutectic bonding of a Ti sputter coated carbon aerogel wafer to an Ni foil [J]. Surface & Coating Technology, 1994, 72(12): 68~69.
- [4] Gale W F, Wen X, Shen Y, et al. Diffusion brazing of titanium aluminide wettability, microstructural development, and mechanical properties [A]. Paul T, Vianco, Mrityujay Sinfh. International brazing and soldering conference proceeding [C]. Albuquerque, New Mexico, 2000. 42~49.
- [5] Niemann J T, Garrett R A. Eutectic bonding of boron aluminum structural components: part 1 evaluation of critical processing parameters [J]. Welding Journal, 1974, 53(4): 175s~184s.
- [6] Niemann J T, Garrett R A. Eutectic bonding of boron aluminum structural components: part 2 development and application of the process [J]. Welding Journal, 1974, 53(8): 351s~360s.
- [7] Timisit R S, Janeway B J. A novel brazing technique for aluminum [J]. Welding Journal, 1994, 73(6): 119s~128s.
- [8] 武恭, 姚良均, 李震夏, 等. 铝及铝合金材料手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.

董占贵，男，1972年出生，博士研究生。主要研究内容为Al合金钎焊、金属与陶瓷低温连接等。发表论文15余篇。
Email:dongzhg@263.net

选自《焊接学报》2002年第1期