

铝基复合材料扩散焊接接合区微连接行为

刘黎明¹, 徐卫平¹, 杨德君², 吴林³, 牛济泰³

(1. 大连理工大学 材料工程系, 大连 116024; 2. 大庆龙南医院 器械科, 大庆 163453;
3. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘 要: 以铝基复合材料 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$ 为对象, 对该种材料扩散焊接接合区微连接行为进行了探索性的研究, 分析了接头微观组织及力学性能。研究表明, 扩散焊接温度对接合区的微连接行为有显著影响, 当焊接温度低于铝基复合材料固相线温度时, 增强相—基体、增强相—增强相之间微连接属弱连接; 当焊接温度介于该种材料液、固两相温度区间时, 接头区域出现液态基体金属, 增强相—基体之间可以实现较好结合, 同时液态金属对增强相—增强相接触部位进行渗透, 使增强相—增强相接触转化为增强相—基体—增强相结合, 在此基础上发现在铝基复合材料液、固两相温度区间有“临界温度”存在, 为成功实现该种材料扩散连接奠定理论基础。

关键词: 铝基复合材料; 扩散焊; 基体; 增强相

中图分类号: TG407 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2001)01-15-04



刘黎明

0 序 言

铝基复合材料由于具有高的比刚度、比强度、耐磨性而在航天、航空、汽车制造业等领域具有广泛的应用前景, 焊接作为该种材料的二次加工技术也倍受人们的关注。由于铝基复合材料基体与增强相之间物理、化学性能相差很大, 导致其焊接性很差, 采用通常的熔焊方法将在焊缝中出现气孔、界面反应物等缺陷, 难以获得高质量接头^[1]。扩散焊作为一种固相连接方法, 由于其焊接温度低可以抑制界面反应, 较有希望实现铝基复合材料的连接, 而受到国内外的广泛关注和深入研究^[2]。铝基复合材料焊接时, 在接合面上将产生基体与基体、基体与增强相、增强相与增强相三种接触形式, 研究^[3~5]表明, 在通常扩散焊接条件下, 基体之间可实现较好的结合, 而其余两种接触形式较难实现良好的结合, 成为扩散焊接接头强度不高的主要原因, 所以如何解决基体—增强相、增强相—增强相之间的微连接问题就成为研究铝基复合材料扩散焊接的关键。迄今为止, 国内外尚未见到有关这方面研究的报道。

本文通过系列试验, 对扩散焊条件下基体—增强相、增强相—增强相之间的微连接行为进行研究, 探索出改善这两种微连接的工艺措施, 首次发现在铝基复合材料液、固两相温度区间有“临界温度”存在, 为成功实现该种材料的扩散连接奠定理论基础。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

采用挤压铸造法制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$ 复合材料, 该种材料在退火状态下拉伸强度为 300 MPa。增强相 Al_2O_3 颗粒平均尺寸为 0.4 μm , 体积比为 30%。本文用于对比试验的基体铝合金采用与制备复合材料相同的工艺参数制备, 拉伸强度为 125 MPa, 其化学成分列于表 1, 采用差热分析法 (TG-DTA) 测定复合材料液—固两相温度区间为 857.5~920.1 K, 如图 1 所示。在液、固两相温度区间基体合金液相体积率随温度变化如图 2 所示。

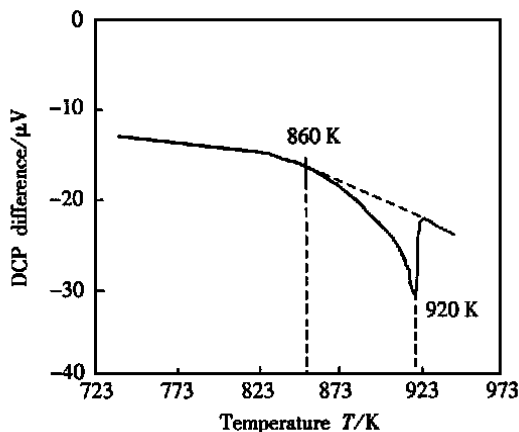


图 1 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$ 复合材料基体合金液—固相区范围的差热分析测定结果

Fig. 1 Determination of liquid—solid co-existing range of 6061Al by differential scanning calorimetry

表 1 6061Al 的化学成分(%)

| Table 1 Chemical composition of 6061Al alloy | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|--------|--------|--------|-----|
| Cu | Mg | Mn | Fe | Si | Zn | Ti | Ni | Al |
| 0.34 | 0.75 | 0.22 | 0.36 | 1.26 | < 0.15 | < 0.05 | < 0.05 | Bal |

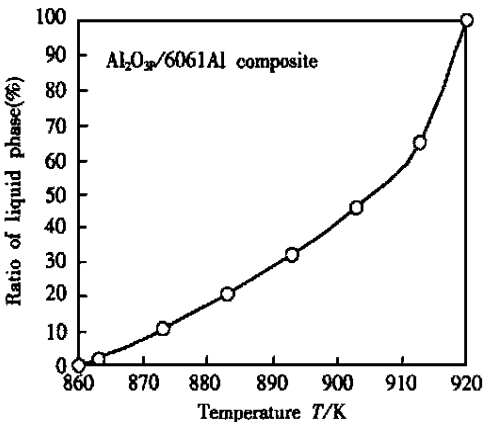


图 2 Al₂O_{3p}/6061Al 复合材料基体液相体积率与温度的关系

Fig. 2 Volume fraction of liquid phase matrix of composite as a function of temperature

1.2 试验步骤

- (1)采用线切割的方法将材料加工成 5 mm× 10 mm× 30 mm 焊件。
- (2)扩散焊接采用电阻加热的方法,在 1.33× 10⁻¹ Pa 的真空室中进行,通过热电偶测量温度并使其在焊接过程中保持恒定。
- (3)在英国 Instron 公司生产的电子万能试验机上进行焊接接头拉伸测试,拉伸速度为 0.5 mm/min。
- (4)利用扫描电镜 SEM 观察接头断口,用 SEM 配置的能谱仪 EDX 对接头断口进行成分分析,以判定扩散焊接接合区微连接状态。

2 试验结果及讨论

为了探讨扩散焊接合面微连接的状态,分别进行复合材料—复合材料(MMC—MMC)、复合材料—基体合金(MMC—6061Al)、基体合金—基体合金(6061Al—6061Al)之间的扩散焊接,如图 3 所示。焊件 6061Al 与 Al₂O_{3p}/6061Al 复合材料基体相同,可以认为在 MMC—MMC 扩散连接中,接合区存在基体—基体、基体—增强相、增强相—增强相三种微连接形式;MMC—6061Al 扩散连接中,接合区存在基体—基体、基体—增强相二种微连接形式。

从图 3 可以看出,基体 6061Al 铝合金接头强度在 773 K 时为 70 MPa,随着焊接温度的上升,拉伸强度逐渐升高,在 853K 焊接温度附近,接头强度趋

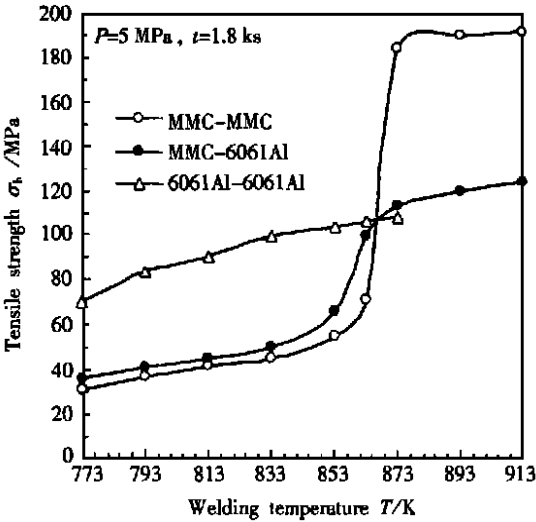


图 3 焊接温度与接头拉伸强度关系曲线

Fig. 3 Relationship between temperature and tensile strength of welded joint

于稳定,约为 108 MPa,相当于铝合金母材强度的 90%。文献[4]研究表明,对于 Al—Mg—Si 系铝合金,当扩散焊接温度接近材料固相线时,接合界面的氧化膜破碎细化,对铝合金接头的破坏作用很小,可以忽略不计,接头强度接近母材强度并趋于稳定,这与本文试验结果相似。

从图 3 可以发现,三种形式接头强度均随焊接温度提高而提高,当焊接温度低于基体合金固相线温度时,MMC—6061Al、MMC—MMC 接头强度明显低于 6061Al—6061Al 接头强度,表明在此规范下,增强相—基体、增强相—增强相之间微连接属弱连接,在接合区中增强相不仅没有起到强化作用,反而在拉应力的作用下增强相与基体、增强相间的接触部位将扩展成为裂纹。在铝基复合材料液、固两相温度区间,MMC—MMC、MMC—6061Al 两种接头强度均高于 MMC—6061Al 接头,表明增强相 Al₂O₃ 颗粒在接合区中发挥了一定的强化作用,并且两种接头强度存在一个明显的温度门槛值,对于 MMC—6061Al 接头,该值约为 863 K(液相体积分数为 2%),对于 MMC—MMC 接头,该值约为 873 K(液相体积分数为 15%)。

为了深入研究增强相—基体之间微连接的变化情况,采用 SEM 观察 MMC—6061Al 接头断口中 MMC 侧的状态,如图 4 所示。可见在焊接温度低于基体合金固相线温度时,断口呈现出 A、B、C 三区见图 4a。断口分析表明:A 区断口呈韧窝状,为明显的 Al 合金断口,表明此时接合区基体—基体结合良好;B 区韧窝小而浅,在断口处可观察到裸露的 Al₂O₃ 颗粒,表明此时接合区基体—增强相不能实现

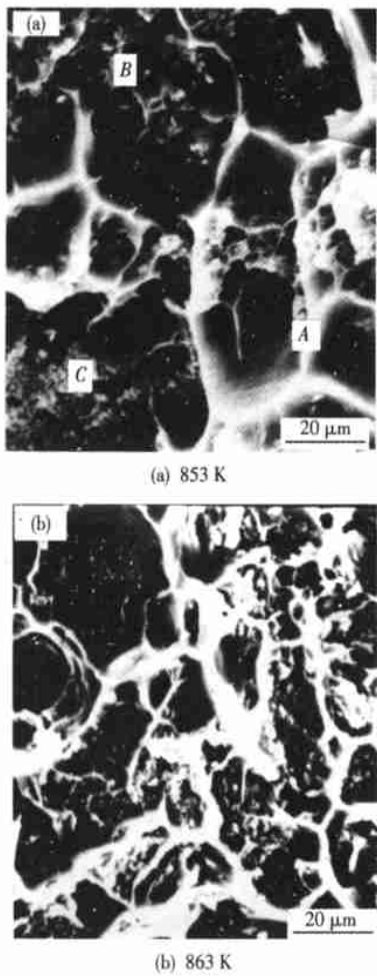


图 4 焊接温度对 MMC—6061Al 接头断口形貌的影响

Fig. 4 Effect of welding temperature on fractograph of MMC—6061Al

($P=5\text{ MPa}$, $t=1.8\text{ ks}$)

良好结合; C 区为脆性断口, 断口表面覆盖一层氧化膜, 为焊接不良区。当焊接温度高于基体合金固相线温度时, 已观察不到氧化膜(关于氧化膜形态及其含量的变化规律将在另文予以专述), 接头断裂发生在靠近母材 6061Al 一侧接合面上, 断口呈明显的韧性断裂见图 4b, 仅在韧窝底部发现有 Al_2O_3 颗粒存在, 对 Al_2O_3 颗粒及颗粒边缘的基体进行 SEM 的 EDX 点分析, 结果如表 2 所示。从表中可以看出, 在断口上的颗粒与附近基体表面的化学成分相似, 表明颗粒表面有一层基体铝合金, 接合面中基体—增强相之间实现了良好的微连接。这是由于在扩散焊接时, 接触面上原子发生一定塑性变形, 具有

表 2 焊接接头断口表面 SEM 的 EDX 点分析结果(%)

| Table 2 Analysis result of SEM and EDX on fractured surface | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|-----|
| Analysis point | Mg | Si | Fe | Cu | Mn | Al |
| Particulate | 0.78 | 1.48 | 0.29 | 0.21 | 0.13 | Bal |
| Matrix | 0.70 | 1.39 | 0.18 | 0.23 | 0.11 | Bal |

较高的能量, 在焊接温度为 863 K 时, 该部位基体金属将优先熔化, 对增强相颗粒进行润湿, 实现二者良好的微连接。

为了进一步研究增强相—增强相之间微连接行为, 采用 SEM 观察 MMC—MMC 接头断口如图 5 所示。

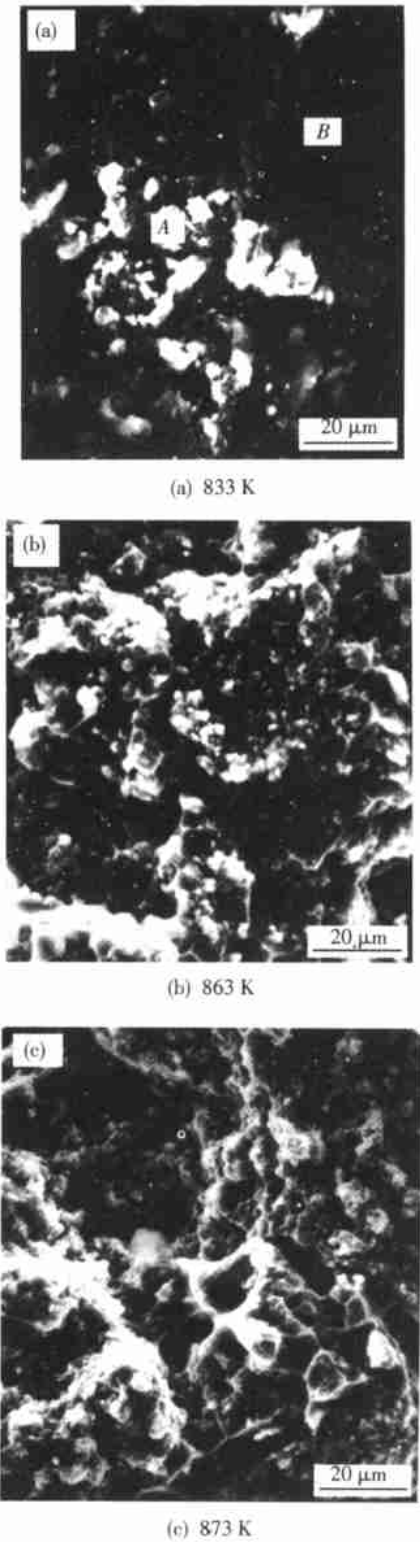


图 5 焊接温度对 MMC—MMC 接头断口形貌的影响

Fig. 5 Effect of welding temperature on fractograph of MMC—MMC

($P=5\text{ MPa}$, $t=1.8\text{ ks}$)

在焊接温度为 833 K 时, 接头断口分为 A、B 二区见图 5a, A 区断口上有明显的裸露 Al_2O_3 颗粒, B 区接头断口呈脆性断裂, 表面覆盖一层氧化膜, 为焊接不良区, 随着焊接温度的升高, 氧化膜逐渐消失, 逐渐出现韧性断裂特征。在焊接温度为 863 K 时, 在韧窝底部与边缘均可观察到增强相 Al_2O_3 颗粒见图 5b, 此时断口分析表明, 韧窝底部的 Al_2O_3 颗粒与基体可以实现较好的结合, 在韧窝边缘为裸露的 Al_2O_3 颗粒, 由对图 4 的分析可知, 此时基体—增强相已实现良好的微连接, 观察到的裸露的 Al_2O_3 颗粒应该这是由于增强相—增强相结合状态不良而产生的。在焊接温度为 873 K 时, 接头断口与 863 K 时类似, 只是在韧窝边缘裸露的 Al_2O_3 颗粒数量急剧减少见图 5c, 说明此时不仅仅是基体—增强相之间可以实现较好的微连接, 而且增强相—增强相连接状况也得到改善。这是由于增强相的熔点 (2561 K) 远远高于基体合金, 在此温度下不可能实现增强相之间的扩散结合, 当焊接温度为 873 K 时, 接头区域出现液相基体金属, 伴随焊接过程的进行, 熔融液态金属渗透到相互接触的增强相之间, 使得大部分增强相直接接触转化为增强相—基体—增强相之间的良好微连接, 使得复合材料的焊接性得到提高。

从图 3 中可以看出, 焊接温度是影响铝基复合材料扩散焊接接合区微连接行为的主要工艺参数, 当焊接温度到达 873 K 时, 接头强度迅速上升并趋于稳定, 称 873K 为本试验条件下 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$ 复合材料的“临界温度”, 这显示出铝基复合材料具有与单一金属显著不同的焊接性。通过上述研究表明, 当焊接温度达到铝基复合材料的“临界温度”时, 接头区域不仅基体—增强相之间可以实现良好结合, 而且增强相—增强相之间微连接状态发生明显改变, 由增强相—增强相之间接触转化为增强相—基体—增强相间的良好微连接, 显著提高铝基复合材料扩散焊接接头强度。

3 结 论

(1) 在低于铝基复合材料固相线温度进行扩散焊接时, 接合区中基体—增强相、增强相—增强相之间微连接属于弱连接, 增强相在接头中不能起到强化作用。

(2) 在本试验条件下, 当焊接温度超过铝基复合材料固相线温度时 (基体液相体积分率达到 2%), 接合界面上液态基体金属将对增强相颗粒进行润湿, 使得基体—增强相之间实现良好的微连接。

(3) 发现在铝基复合材料液、固两相温度区间有“临界温度”存在, 当焊接温度达到该温度值时 (在本试验条件下基体液相体积分率达到 15%), 接头区域增强相—增强相之间微连接状态发生明显改变, 由增强相—增强相之间接触转化为增强相—基体—增强相之间的良好微连接, 此时最佳焊接工艺参数为: 焊接压力 5 MPa、焊接时间 1.8 ks、焊接温度 873 K。

参考文献:

- [1] 池内建二. アルミニウム基复合材料[J]. 溶接学会志, 1988, 57(6): 414~420.
- [2] 園城敏男. アルミナ短繊維強化 A6063 アルミニウム合金の拡散結合[J]. 溶接学会論文集, 1987, 5(3): 317~322.
- [3] 廣瀬明夫. 金属基复合材料的結合[J]. 溶接学会志, 1996, 65(4): 1692~1698.
- [4] 池内建二, 小谷启子. Al-Mg-Si 系 6063 合金の拡散接合界面における酸化物挙動[J]. 溶接学会論文集, 1996, 14(1): 122~128.
- [5] 刘黎明. 铝基复合材料非夹层液相扩散焊接机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.

作者简介: 刘黎明, 男, 1967 年 11 月出生, 工学博士。主要从事新材料焊接性研究工作, 发表关于金属基复合材料焊接性研究论文 20 余篇。

(编辑: 王 亚)

国际著名检索系统简介

英国《科学文摘》(SA)

英国《科学文摘》(SCIENCE ABSTRACTS, 简称 SA) 创刊于 1898 年, 是由英国电气工程师协会编辑出版的一种科学技术领域内的综合性检索系统, 现分为 4 辑, 分别为《科学文摘 A 辑: 物理文摘》、《科学文摘 B 辑: 电气与电学文摘》、《科学文摘 C 辑: 计算机与控制文摘》、《科学文摘 D 辑: 信息技术》。该系统文献来源于世界上约 4 000 余种科技期刊、科技报告、会议论文、学位论文和新书等出版物资料, 年报道量达 37 万余条, 主要报道物理、电子学、电子工程、自动控制、计算机以及信息技术等方面的主要文献。