

加热与热处理

## 退火温度对共挤压 DP600/AA1060 层合板微观组织及力学性能的影响

江永涛, 彭凤英, 廖娟

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116)

**摘要:** 以转角复合挤压工艺制备的 DP600/AA1060 (双相钢/铝) 层合板为研究对象, 探究不同退火温度 (490、520 和 550 °C) 下层合板的界面力学性能及微观组织。通过界面剪切试验和显微硬度测试试验对界面结合处及两侧金属进行了力学性能研究, 采用扫描电镜和能谱仪分析不同退火温度对层合板界面形貌变化和成分分布的影响。试验结果表明: 退火处理有助于提高层合板结合区域的硬度。随着退火温度的升高, 界面剪切强度增加, 在 550 °C 下界面剪切强度相比于未退火时提高了 2.2 倍。随着退火温度的升高, 钢/铝复合界面开始出现间断的扩散层, 界面主要失效形式由脆性断裂转变为韧性断裂, 层合板的塑性变形能力得到了改善。

**关键词:** DP600/AA1060 层合板; 转角复合挤压工艺; 退火温度; 显微硬度; 界面强度; 微观组织; 共挤压成形

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.05.028

**中图分类号:** TG156; TB331

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 05-0219-07

## Influence of annealing temperature on microstructure and mechanical properties for DP600/AA1060 laminate produced by co-extrusion process

Jiang Yongtao, Peng Fengying, Liao Juan

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** For DP600/AA1060 (dual-phase steel/aluminum) laminate produced by angular co-extrusion process, the interfacial mechanical properties and microstructure of laminates at different annealing temperatures of 490, 520 and 550 °C were explored. Then, the mechanical properties of metal at the interface and on both sides were studied by interfacial shear test and micro-hardness test, and the influences of different annealing temperatures on the interfacial morphology change and composition distribution of laminates were analyzed by scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy. The results indicate that annealing treatment contributes to the increasing of hardness in the bond region of laminates. With the increasing of annealing temperature, the interfacial shear strength increases. The interfacial shear strength at 550 °C increases by 2.2 times higher than that without annealing. With the increasing of annealing temperature, the discontinuous diffusion layer appears at the steel/aluminum interface. Additionally, the primary failure mode of the interface transitions from brittle fracture to ductile fracture, and the plastic deformation ability of laminates is improved.

**Key words:** DP600/AA1060 laminate; corner compound extrusion process; annealing temperature; microhardness; interface strength; microstructure; co-extrusion forming

随着工业的不断发展, 单质金属材料已难以满足不断多样化的功能需求<sup>[1-2]</sup>。金属复合材料能够充分发挥各组成金属的优良特性, 综合提升其性能<sup>[3-5]</sup>。双相钢/铝层合板具备双相钢材料的高强度、

高硬度和高成形性, 同时兼备金属铝良好的导热性和耐腐蚀性, 因此, 成为一种高性价比、高性能的复合材料<sup>[6-8]</sup>。转角复合挤压工艺制备双相钢/铝层合板时充分考虑了双相钢和铝的塑性性能差异, 以解决由于变形抗力不同而引起的界面缺陷问题<sup>[9-10]</sup>。

为了深入了解钢/铝层合板的复合机理, 科研人员对钢/铝层合板界面的微观组织生长规律展开了研究。吴铭方等<sup>[11]</sup>探究了纯铝/纯铁结合界面在不同温度和保温时间下的界面反应层生长机理。结果显示, 在加热温度为 540 °C、保温时间在 60~300 min 时, 结合层化合物由不稳定的 FeAl<sub>x</sub> 和 FeAl 相转变

收稿日期: 2023-10-19; 修订日期: 2024-01-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12272094); 福建省自然科学基金资助项目 (2022J01541)

作者简介: 江永涛 (2001-), 男, 硕士研究生

E-mail: 230220011@fzu.edu.cn

通信作者: 廖娟 (1984-), 女, 博士, 教授

E-mail: jliao@fzu.edu.cn

为稳定的  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  和  $\text{FeAl}_3$  相, 并且结合层明显变厚。黄健康等<sup>[12]</sup> 基于热力学基本定律建立了铝/镀锌钢金属间化合物生成的吉布斯自由能计算模型, 计算结果显示, 生成  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  的吉布斯自由能变化比生成  $\text{FeAl}_3$  要小得多。这说明在界面上  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  比  $\text{FeAl}_3$  优先生成, 而  $\text{FeAl}_3$  相则是在熔体冷却过程中  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  与 Al 原子结合而生成的。陈楠楠等<sup>[13]</sup> 基于焊接工艺对铁铝金属间化合物生长影响的分析结果, 提出了金属间化合物  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  生长模型。研究表明, 在焊接过程中,  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  由不连续分布的细小等轴晶转变为连续分布的粗大柱状晶, 晶粒取向由随机分布转变为沿  $[001]$  晶向的定向分布, 并且垂直于界面。

与此同时, 双金属层合板界面失效行为也备受关注。田蒙蒙等<sup>[14]</sup> 研究了热处理温度对共挤压制备的 Ti6Al4V 钛合金/AA1050 铝层合板结合层的影响, 结果表明, 在复合过程中主要发生原子间的相互扩散, 形成固溶体以实现结合。断口失效区主要成分为固溶体, 热处理的主要作用是促进原子间充分扩散。李小兵等<sup>[15]</sup> 对轧制制备的 Q235 钢/Al100 铝层状复合板进行了拉伸试验, 并观察了样品情况。研究发现, 由于碳钢和铝之间的不协调变形, 界面产生了附加应力和微裂纹。在拉伸过程中, 结合层首先出现微裂纹横向生长并延伸至基材部分, 最终导致层合板失效。

基于以上研究, 均是通过对双金属层合板的制

备与性能研究, 从而深入探究界面微观组织生长规律以及界面失效行为, 这对进一步了解和优化双金属层合板的性能具有重要意义。故本文将选用 DP600 双相钢和 AA1060 纯铝作为挤压基材, 利用转角复合挤压工艺制备 DP600/AA1060 层合板试样, 研究不同热处理温度对复合界面剪切强度和界面硬度的影响, 分析不同热处理温度下界面形貌和元素扩散分布情况。

1 试验材料及方法

1.1 材料制备

试验采用 DP600 双相钢、AA1060 铝作为挤压基材, 两种材料的化学成分见表 1。从厚度为 0.8 mm 的 DP600 双相钢板切出 80 mm×10 mm 的待挤压尺寸, AA1060 铝棒的直径为  $\Phi 20$  mm、长度为 66 mm。

表 1 材料的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of material  
(%, mass fraction)

| 材料        | Si   | Mn   | C    | Fe  | Al    | 其他   |
|-----------|------|------|------|-----|-------|------|
| AA1060 铝  | 0.25 | 0.03 | —    | 0.3 | 余量    | 0.02 |
| DP600 双相钢 | 0.20 | 0.85 | 0.09 | 余量  | 0.049 | 0.12 |

利用转角复合挤压模具在高温下进行层合板制备, 挤压装置如图 1 所示。DP600 双相钢通过挤压时产生的摩擦力进行送料, 进料方向为水平方向。

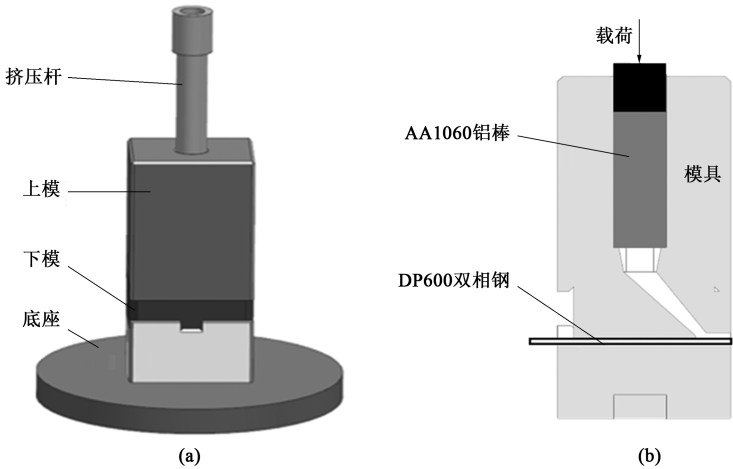


图 1 挤压示意图

(a) 挤压模具 (b) 挤压路径

Fig. 1 Schematic diagram of extrusion

(a) Extrusion mold (b) Extrusion path

两种金属接触前, DP600 双相钢未发生变形。当向 AA1060 铝施加载荷时, 铝棒沿着通道向下运动, 直至与 DP600 双相钢表面接触。随后在挤压力和摩擦力作用下 AA1060 铝和 DP600 双

相钢共同从工作部位中挤出。对挤压设备和坯料加热至 470 ℃, 保温 1 h; 挤压速度为  $1\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 挤压温度为 470 ℃; 挤压结束, 再进行保温 1 h。

## 1.2 力学性能测试

对挤压得到的 DP600/AA1060 层合板试样进行退火热处理,加热、保温过程以及冷却过程均在热处理炉内完成,保温时间为 4 h,炉内冷却至 100 ℃时,空冷至室温。保温温度分别为 490、520 和 550 ℃。采用 MVC-1000D1 显微硬度计测量不同热处理温度条件下 DP600/AA1060 层合板界面区域的显微硬度值。加载压力为 100 g,保荷时间为 10 s,测试点分布情况如图 2 所示,沿界面结合方向测取 5 个点,以平均值作为界面硬度。DP600 双相钢侧和 AA1060 铝侧的硬度测量方向与界面结合方向垂直,分别在界面两侧取 3 个点测量硬度值,间隔为 200 μm。

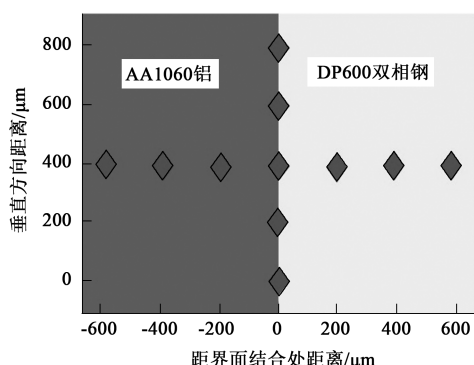


图 2 层合板界面硬度测试点分布

Fig. 2 Distribution of hardness test points at interface of laminates

采用专用模具在型号为 Instron 1185 型试验机上测试层合板的剪切强度,加载速度为  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。图 3 为剪切试验装置图,剪切试验装置主要由冲头、压块、剪切夹具组成。DP600 双相钢侧在冲头作用下与 AA1060 铝侧产生剥离。层合板剪切强度的计算公式如下:

$$\tau = F/S \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为 DP600/AA1060 层合板剪切强度, MPa;  $F$  为剪切断裂最大载荷, N;  $S$  为 DP600/AA1060 层合板受剪横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

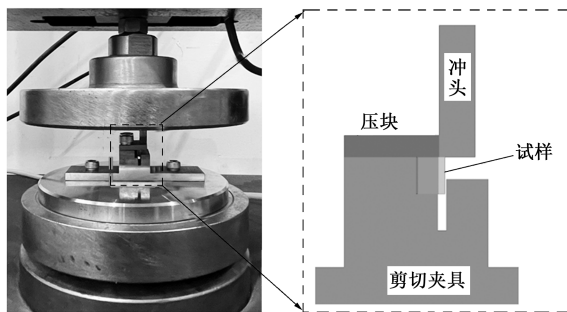


图 3 剪切装置

Fig. 3 Shear device

## 1.3 微观试验测试

对经过不同退火温度热处理后的 DP600/AA1060 层合板试样分别切取金相试样并镶嵌后,水磨抛光。采用钨灯丝扫描电子显微镜对 DP600/AA1060 层合板界面形貌和剪切失效断口进行观察,采用能量色散 X 射线光谱 (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) 线扫对其结合界面区域元素分布进行扩散分析。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 力学性能分析

对层合板进行界面硬度测量时,规定 AA1060/DP600 复合界面的横坐标在“0”点处,AA1060 铝侧横坐标为负,DP600 双相钢侧横坐标为正。图 4a 所示为不同退火温度下层合板界面的硬度分布情况。

由图 4a 可见,在横坐标  $-600 \sim -200 \mu\text{m}$  范围内,热处理对 AA1060 铝侧硬度影响较小,其硬度值约为 23 HV;而 DP600 双相钢侧在横坐标  $200 \sim 600 \mu\text{m}$  范围时,热处理使界面硬度减小,490 ℃下硬度值为 184.5 HV,520 ℃下硬度值为 160.2 HV,550 ℃下为 168.6 HV。DP600/AA1060 复合界面(“0”点处)的硬度在退火处理的影响下得到增强。复合界面硬度如图 4b 所示,在不同退火温度的影响下,相对于未热处理的层合板界面硬度,热处理后的界面硬度依次增加了 78.2%、16.6%和 23.35%。从图 4b 中可以发现,550 ℃下结合处的硬度要大于 520 ℃时的硬度,这是因为随着退火温度的进一步升高,原子扩散加剧同时扩散层厚度增大,从而导致金属间化合物增多,使得硬度有所增大<sup>[16]</sup>。

为了验证退火温度是否会影响 DP600/AA1060 层合板的结合强度,对复合界面进行了剪切试验,试验结果如图 5 所示。与未进行热处理的层合板剪切强度作对比,热处理对结合强度起到了增强的作用。随着温度的升高,剪切强度增强,其依次增加了 154.4%、182.2%和 219.9%。

### 2.2 界面形貌分析

通过转角复合挤压工艺制备出的层合板结合界面原始形貌如图 6a 所示。随后对层合板进行退火热处理,图 6b~图 6d 为在保温时间为 4 h、不同的退火温度下的层合板界面的扫描电镜形貌。从图 6a 所示的界面形貌可以看出,在未经退火处理的 DP600/AA1060 层合板界面处未观察到裂纹缺陷,并且组织均匀无明显扩散层生成。退火热处理后,界面组织出现了一些非连续的扩散层。图 6b 展示了在 490 ℃退火下的界面形貌,可以看到界面开始出现扩散层。

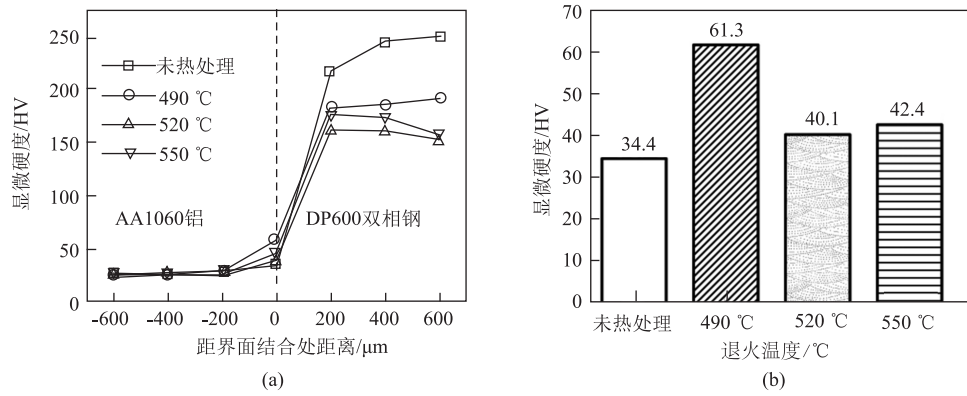


图 4 层合板界面硬度分布

(a) DP600/AA1060 界面区域硬度 (b) 不同热处理温度下的界面硬度

Fig. 4 Distribution of interfacial hardness for laminates

(a) Hardness of DP600/AA1060 interfacial area (b) Interfacial hardness at different heat treatment temperatures

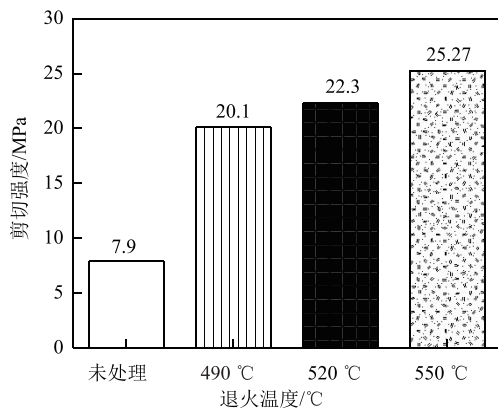


图 5 不同退火温度下的界面剪切强度

Fig. 5 Shear strength of interface at different annealing temperatures

为了进一步研究层合板界面处的元素扩散规律, 对未热处理样品和不同热处理条件下的界面进行了 EDS 成分分析。由于 Fe 和 Al 元素在两种合金中含量较高且易发生固溶扩散, 因此, 主要对这些元素进行了测量。此外, 考虑到层合板在高温挤压制备过程中可能发生高温氧化的情况, 也对界面的氧元素进行了测试分析。

从图 7 中可见, 氧元素含量较低, 说明在发生挤压前, 基材表面未发生严重的氧化。在共挤压试验过程中, 结合处两侧基材接触后受到剧烈的挤压力, 使原来的氧化表面破裂生出新的表面; 在高温下金属新表面接触, 原子间相互扩散并实现了挤压结合。并且由图 7 中 Fe、Al 元素的分布曲线可知, Fe 原子和 Al 原子在复合界面处发生扩散, 复合界面两侧

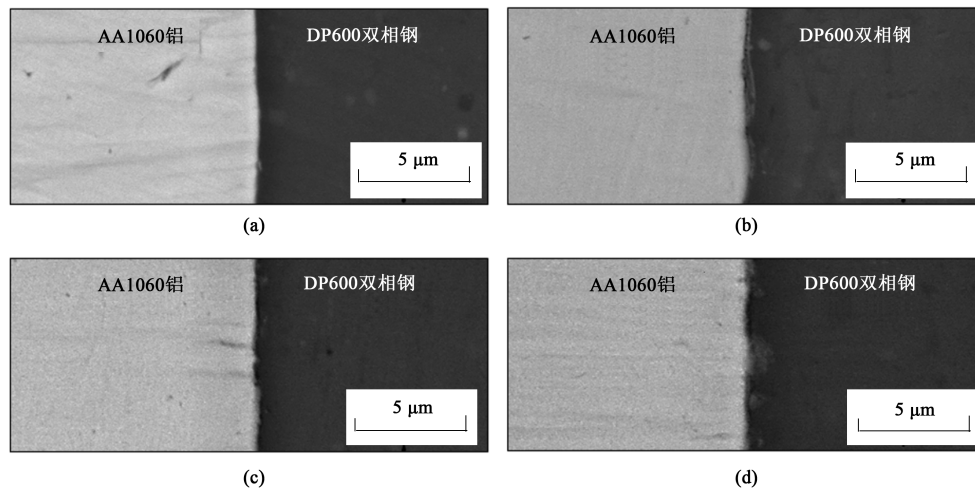


图 6 不同退火温度下的界面形貌

(a) 未热处理 (b) 490 °C (c) 520 °C (d) 550 °C

Fig. 6 Interface morphologies at different annealing temperatures

(a) Without heat treatment (b) 490 °C (c) 520 °C (d) 550 °C



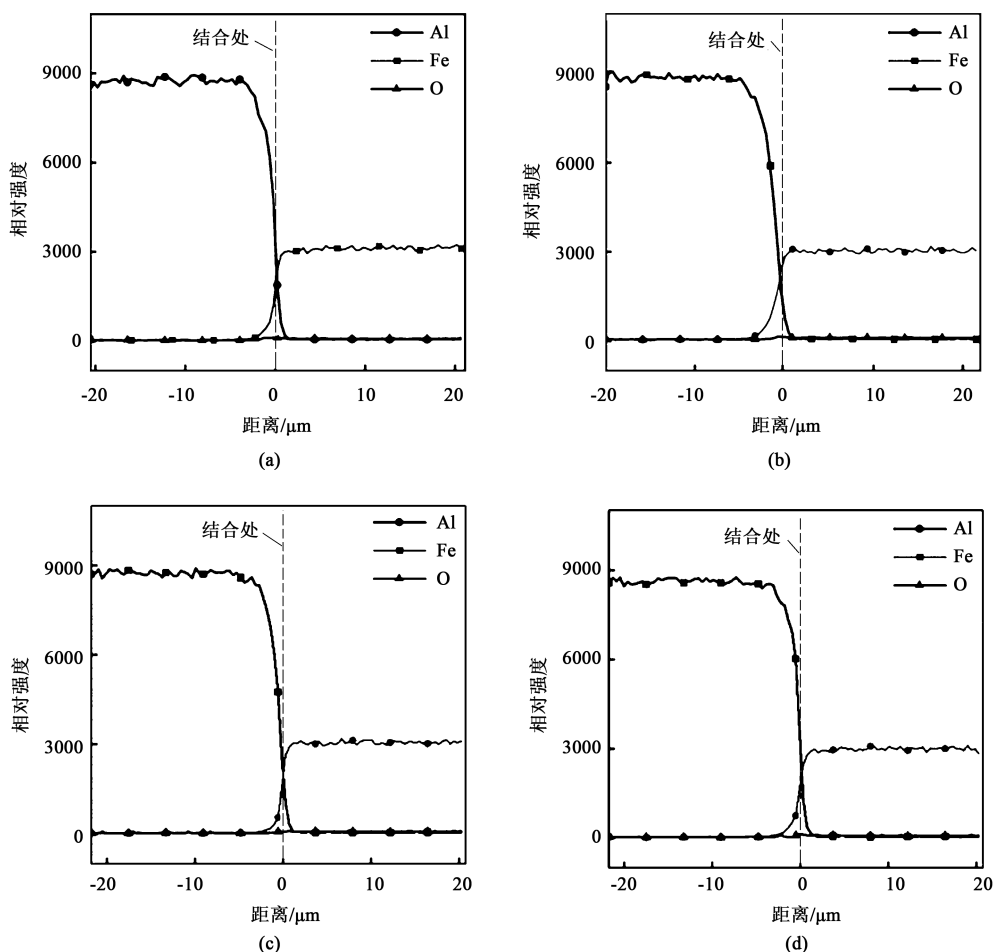


图7 DP600/AA1060 层合板的界面成分分析

(a) 未热处理 (b) 490 °C (c) 520 °C (d) 550 °C

Fig. 7 Composition analysis of DP600/AA1060 laminate interface

(a) Without heat treatment untreated (b) 490 °C (c) 520 °C (d) 550 °C

Fe、Al 原子含量升高, 形成了稳定的固溶体。

在图7中, 对 Fe、Al 元素分布距离测量可知, Fe、Al 原子发生相互扩散的宽度均在 4 μm 左右, 并且随着退火温度变化, Fe、Al 元素相互扩散范围几乎不变。说明在 490~550 °C 退火温度范围内对结合区域的 Fe、Al 元素成分扩散分布影响较小。

### 2.3 失效行为分析

图8为 DP600/AA1060 层合板界面剪切失效在 DP600 双相钢侧的断口宏观形貌图, 反映出不同热处理温度对复合界面失效行为的影响。热处理的作用能够使组织均匀, 促进扩散<sup>[17]</sup>。如图8a所示, 未热处理的 DP600 双相钢侧断口形貌齐平, 图8b中存在片状铝和黑色点状氧化铝, 说明未热处理情况下复合界面失效以脆性断裂为主, 因此说明界面结合强度较低。韧性断裂的断口处可以明显看到在发生破坏前和破坏时, 组织因产生塑性变形而留下

的撕裂痕迹。图8c、图8e、图8g 分别对应退火温度 490、520 和 550 °C 下的断口宏观形貌, 竖直剪切方向上呈针状的白色部分为复合在 DP600 侧的铝, 并且随退火温度的增加, 针状铝在双相钢侧逐渐增多。

图8d为 490 °C 下的扫描图像, 断口中既存在河流样貌又形成部分韧窝, 这说明结合处存在韧性断裂, 该温度下的结合强度增加。由于在剪切力的作用下在晶界、孪晶带、大量位错塞积处形成微裂纹, 相邻裂纹延伸、聚合形成孔洞, 导致剪切失效, 在断口处形成沿剪切方向的伸长韧窝<sup>[18]</sup>, 如图8f和图8h所示, DP600 双相钢侧清晰可见出现许多韧窝。图8h韧窝中还出现了白色组织, 根据扩散原理可知, 在原子扩散过程中, 界面达到一定浓度时会产生中间相; 同时, 如图6d所示, 在温度为 550 °C 时, DP600/AA1060 层合板的复合界面出现间断的灰色扩散层。因此, 推测该复合界面处可能生成了金属化合物, 具

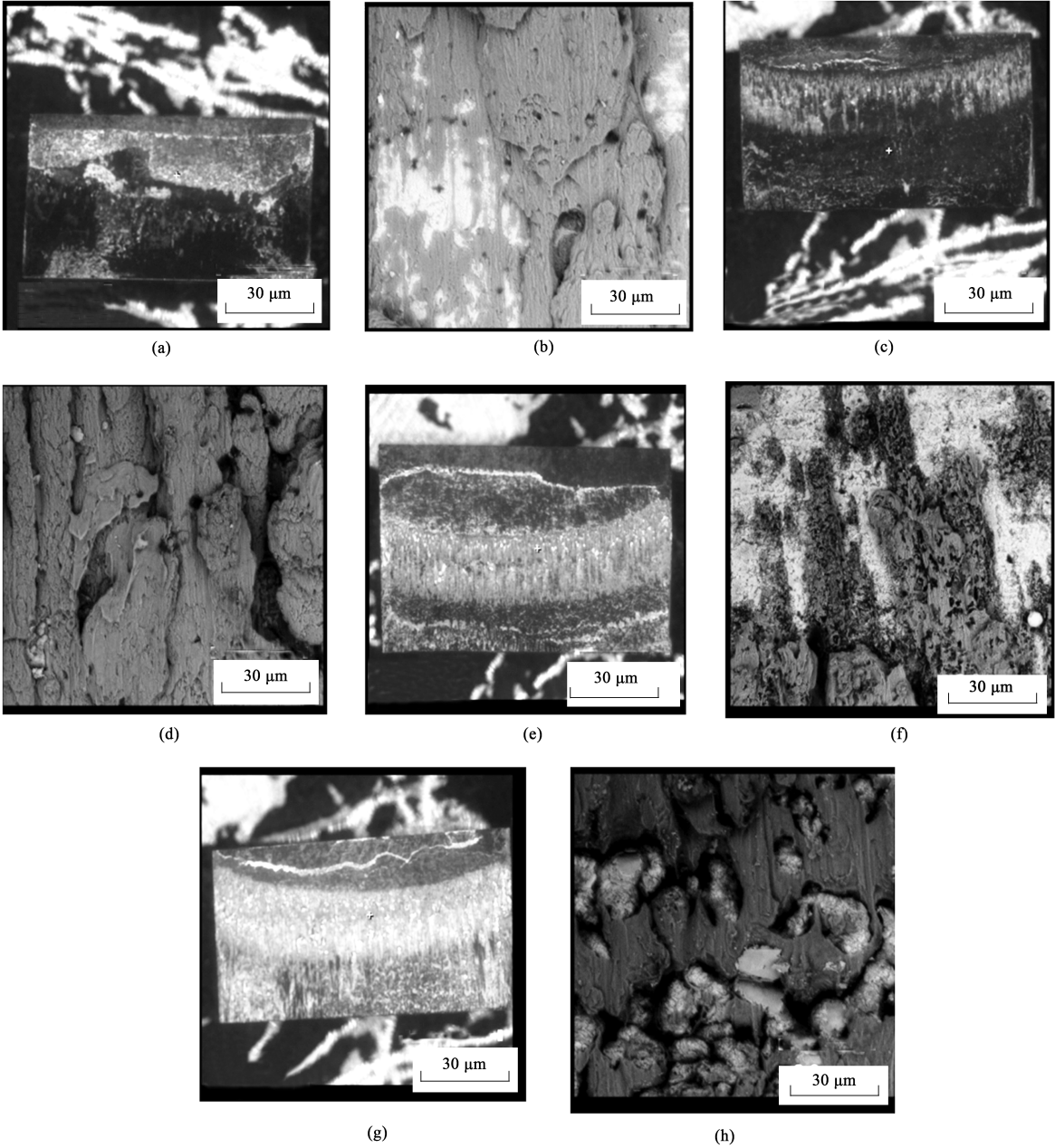


图 8 DP600 双相钢侧断口宏观形貌和微观组织

(a) 未热处理的宏观断口 (b) 未热处理的微观组织 (c) 490 °C 下宏观断口 (d) 490 °C 下微观组织 (e) 520 °C 下宏观断口 (f) 520 °C 下微观组织 (g) 550 °C 下宏观断口 (h) 550 °C 下微观组织

Fig. 8 Macroscopic morphology and microstructure of fracture in side of DP600 dual-phase steel

(a) Macrofracture without heat treatment (b) Microstructure without heat treatment (c) Macrofracture at 490 °C (d) Microstructure at 490 °C (e) Macrofracture at 520 °C (f) Microstructure at 520 °C (g) Macrofracture at 550 °C (h) Microstructure at 550 °C

体生成物质需进一步研究确定。以上结论表明，热处理温度升高，使复合界面剪切的主要失效方式从脆性断裂转变为韧性断裂，促进剪切强度升高。

3 结论

(1) 经过退火处理后，结合界面处组织扩散均

匀并产生了非连续性的扩散层，同时，微观组织的变化使剪切强度、界面硬度相比于未热处理样品有所改善。

(2) 在退火温度为 470~550 °C 范围内，随着退火温度的升高，层合板剪切强度增加。在退火温度 550 °C 下结合强度达到了 25.27 MPa，是未退火处理情况下的 3.2 倍。同时，在退火温度的影响下，复

合界面硬度增强,相比未热处理组(维氏硬度值 34.4 HV)最高增加了 78.2%。

(3) 共挤压制备的 DP600/AA1060 层合板在未进行热处理前无明显扩散层出现,但在共挤压过程中受到高温和强烈的挤压力作用金属表面接触并发生挤压结合,Fe、Al 原子相互扩散,生成了固溶体。经过退火热处理后,Fe、Al 元素扩散距离不变,但复合界面出现间断的扩散层。

(4) 未退火处理的共挤压层合板失效方式为脆性断裂,在退火温度为 490~550 ℃ 范围内,随退火温度的升高,复合界面失效由脆性断裂转变为韧性断裂。说明退火处理有助于改善 DP600/AA1060 层合板的力学性能,使其在应力加载下更加稳定、可靠。

#### 参考文献:

- [1] 张荻,熊定邦,李志强.铜基复合材料的构型多功能化[J].材料科学与工艺,2020,28(3):109-115.  
Zhang D, Xiong D B, Li Z Q. Multifunctional copper matrix composites by architecture design[J]. Materials Science and Technology, 2020, 28(3): 109-115.
- [2] Lal S, Sehrawat R, Sharma N. A short review on the developments of aluminium matrix composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 2: 12.
- [3] Bergh T, Fyhn H, Sandnes L, et al. Multi-material joining of an aluminum alloy to copper, steel, and titanium by hybrid metal extrusion & bonding[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2023, 54(7): 2689-2702.
- [4] 于海洋,胡志力. DP590 钢/7075 铝异种金属搅拌摩擦搭接界面组织与力学性能研究[J]. 机械工程学报,2020,56(6):65-72.  
Yu H Y, Hu Z L. Investigation of interfacial microstructure and mechanical properties for DP590 steel/7075 aluminum dissimilar materials friction stir lap welding joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(6): 65-72.
- [5] Nandan G, Arora K S, Singh J, et al. Influence of different process parameters on microstructural and mechanical properties of cold metal transfer joining of DP600 steel and Al 5052 alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 33(7): 3338-3352.
- [6] 周琳君,李林泽,田亚强,等.商用汽车车轮用珠光体钢和双相钢的研究现状[J].金属热处理,2023,48(8):209-218.  
Zhou L J, Li L Z, Tian Y Q, et al. Research status of pearlitic steel and dual phase steel for commercial vehicle wheel[J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(8): 209-218.
- [7] 白婧.钢/铝复合板轧制过程数值模拟及实验研究[D].秦皇岛:燕山大学,2021.  
Bai Q. Numerical Simulation and Experimental Study on Rolling Process of Steel/Al Clad Plate[D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2021.
- [8] Singh B, Kumar I, Saxena K K, et al. A future prospects and current scenario of aluminium metal matrix composites characteristics[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 76: 1-17.
- [9] 徐梓淦.钢铝极薄带累积叠轧工艺及界面行为研究[D].沈阳:东北大学,2017.  
Xu Z G. Accumulative Roll Bonding and Interface Behavior of Steel-Al Ultra-thin Strips[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [10] Xue X, Sun K, Tian M M, et al. Analysis of forming-induced distortion of dissimilar Ti6Al4V/AA1050 laminate made by non-equal channel lateral co-extrusion[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110: 1627-1640.
- [11] 吴铭方,司乃潮,王敬,等.铁/铝扩散偶界面反应层生长机理分析[J].焊接学报,2011,32(5):29-32,114.  
Wu M F, Si N C, Wang J, et al. Analysis on grow the mechanism on interfacial in terlayer on Fe/Al couple[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(5): 29-32, 114.
- [12] 黄健康,何翠翠,石珂,等.铝/钢异种金属焊接接头界面 Al-Fe 金属间化合物生成及其热力学分析[J].吉林大学学报:工学版,2014,44(4):1037-1041.  
Huang J C, He C C, Shi Y, et al. Thermodynamic analysis of Al-Fe intermetallic compounds formed by dissimilar joining of aluminum and galvanized steel[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2014, 44(4): 1037-1041.
- [13] Chen N N, Wang M, Wang H P, et al. Microstructural and mechanical evolution of Al/steel interface with Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> growth in resistance spot welding of aluminum to steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 424-434.
- [14] 田蒙蒙,孙凯,廖娟,等.热处理对钛铝复合板共挤压界面结合特性的影响[J].材料热处理学报,2022,42(9):22-28.  
Tian M M, Sun K, Liao J, et al. Effect of heat treatment on interface bonding characteristics of Ti-Al composite plate by co-extrusion[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 42(9): 22-28.
- [15] 李小兵,蒋国民,王强,等.钢/铝层状复合板的拉伸力学性能与界面失效过程[J].中国有色金属学报,2021,31(8):2125-2135.  
Li X B, Jiang W G, Wang Q, et al. Mechanical properties and interface failure behavior of steel/Al laminated composite sheets during tensile test[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(8): 2125-2135.
- [16] 王小苗. TA1/5052 复合板爆炸焊接组织及性能研究[D].西安:长安大学,2021.  
Wang X M. Microstructure and Properties of Explosion Welding TA1/5052 Composite Plate[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [17] 邹朝江,郑腾腾,张正,等.固溶前预热对 Ti6Al4V 合金厚截面环锻件组织均匀性的影响[J].锻压技术,2023,48(9):213-219.  
Zou C J, Zheng T T, Zhang Z, et al. Influence of preheating before solution on microstructure uniformity for Ti6Al4V alloy ring forgings with thick cross-section[J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48(9): 213-219.
- [18] 夏鸿博.钛-铝爆炸复合板的性能及其界面微观结构[D].南京:南京航空航天大学,2014.  
Xia H B. Properties and Interfacial Microstructure of Titanium-aluminium Composite Plates with Explosive Welding[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.