

波-平轧制钛/铝复合板界面组织特性及性能研究

李亚杰, 马承睿, 刘翠荣, 祝志远, 张培林

(太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 建立 Ti/Al 复合板波-平轧与平轧有限元模拟并进行试验, 分析不同轧制方式对复合板微观组织及力学性能的影响。结果表明, 复合板压下率为 40%时翘曲程度较压下率 35%更小, 波-平轧复合板的等效应力及应变均大于平轧复合板, 其结合界面未发现孔洞与裂缝, 波峰处界面扩散层厚度为 1.8 μm , 波谷处为 2.4 μm , 而平轧复合板的界面扩散层厚度为 1.6 μm , 并且波-平轧复合板 Al 板的再结晶程度高于平轧, 其抗拉强度、抗弯性能、硬度也高于平轧复合板, 但由于加工硬化作用延伸率较低。

关键词: Ti/Al 复合板; 有限元模拟; 波-平轧制; 力学性能

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)09-3264-09

钛(Ti)及其合金具有抗腐蚀、耐高温、耐冲击等优点, 广泛应用于航空航天、医疗、军事等领域, 但是价格昂贵, 大量使用会增加制造成本^[1-2]。铝(Al)及其合金具有良好的导电导热性, 价格低廉, 但是铝合金在高温和酸碱环境下性能不佳^[3]。钛、铝 2 种材料的以上缺点限制了它们的应用范围, 但 Ti/Al 复合板综合性能良好, 而且可以降低制造成本, 使其应用前景更加广阔^[4-5]。

目前国内外学者对于 Ti/Al 层状复合板的制备及性能表征分析已经进行了大量研究, 例如轧制爆炸复合法、热压扩散法、轧制复合法等^[6]。Bataev 等^[7]利用爆炸复合法制备 Al-Al₃Ti-Ti 复合板后进行不同时间的退火处理, 研究金属间化合物生长的复杂性。但是爆炸复合法不能生产较薄的板坯, 并且制备过程中会产生噪声与有毒气体, 对人体和环境都有很大的危害^[8-9]。Fan 等^[10]利用 550℃真空热压法成功制备 Ti/Al 复合板, 但是热压扩散法制备复合板周期较长, 加工温度较高会导致晶粒尺寸变大, 强度降低, 通常需要对复合板进行轧制来提高其界面结合强度^[6]。轧制复合法是利用高温和轧制时产生的高压使不同的金属实现焊接^[11]。相较于爆炸复合法和热压扩散复合法, 轧制复合法工艺简单, 生产效率高, 成本低便于批量化生产^[12]。Chaudhari 等^[13]建立了多层双金属复合板冷轧的分析模型, 将该模型应用于 Ti/Al 复合板, 实验结果与模拟结果吻合良好。Qi 等^[14]利用感应加热差温轧制法制备 CP-Ti/AA6061-Al 层状复合材料, 发现复

合界面结合强度随轧制压下量的增加而提高。Xiao 等^[15]通过加热 Ti 层的差温轧制法制备了 Ti/Al 复合板, 随着 Ti 层加热温度的升高和总压下量的增加, Ti/Al 复合板变形更加均匀。

普通轧制法制备的 Ti/Al 复合板由于 Ti、Al 2 种金属的变形抗力差异较大, 得到的复合板翘曲严重, 差温轧制法制备复合板操作复杂, 易造成板材氧化严重。为此本研究选用波-平轧制法获得 Ti/Al 复合板, 采用有限元法对波-平轧与平轧 Ti/Al 复合板轧制结果进行模拟, 并对波-平轧与平轧的 Ti/Al 复合板进行实验研究, 分析了不同轧制方式得到的复合板微观组织与力学性能的差异。

1 有限元模拟过程相关参数设置

利用 ABAQUS 有限元模拟软件对波-平轧与平轧 Ti/Al 复合板轧制过程进行模拟。

模拟过程中, 波纹辊与平辊的直径为 150 mm, 辊身为 100 mm, 上辊波纹辊与 Ti 板摩擦系数为 0.26, Ti 板与 Al 板摩擦系数为 0.45, 下辊平辊与 Al 板摩擦系数为 0.36, 所有摩擦类型均为罚摩擦。波-平轧与平轧 Ti/Al 复合板的压下率为 35%和 40%, 分别记为 B35%、B40%、P35%、P40%。板材的初始温度为 300 °C, 轧辊温度为 25 °C, 室温设置为 25 °C, 板材网格划分采用六面体网格单元。模拟中其他条件均为理想条件, 其他参数设置与实际实验相同, TA1 与

收稿日期: 2022-09-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0707305); 山西省自然科学基金 (202103021224282, 202103021223288); 山西省高等学校科技创新项目 (2020L0331); 太原科技大学博士启动基金 (20192020、20192071)

作者简介: 李亚杰, 男, 1985 年生, 博士, 副教授, 太原科技大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024, E-mail: 2019021@tyust.edu.cn

AA6061 铝合金板的相关物理性能如表 1 所示。

2 实验

本实验选用的 2 种材料分别是尺寸为 100 mm×50 mm×2 mm 的 TA1 纯钛板和 100 mm×50 mm×4 mm 的铝合金 AA6061 板,其中 Al 板为基板,Ti 板为覆板,2 种材料的化学成分列于表 2,力学性能列于表 3。切好后的 Ti/Al 板使用乙醇清洗表面,然后打磨去除待复合表面的金属氧化物,使用超声波和乙醇清洗打磨好的板材后立即用吹风机吹干表面。将待复合的金属板材叠放在一起组胚,板材前后位置绑好固定。Ti/Al 复合板分别使用波-平轧及平轧方式进行制备,波-平轧上辊为波纹辊,呈横波形,波形曲线采用正弦曲线,轧辊直径为 150 mm,辊面上振幅为 0.5 mm,波纹数量为 100,对应不易变形的 Ti 板;下辊采用平辊,对应易变形的 Al 板。轧制温度为 300 °C,压下率为 40%,其中波-平轧记为 B40%,平轧记为 P40%。

轧制完成后的复合板利用电火花线切割机切取尺寸为 10 mm×8 mm×5 mm 的金相试样,对 B40%和 P40%试样进行 300 °C 退火 30 min 后空冷至室温。借助于 XRD 技术进行物相成分分析,扫描速度为 5°/min。采用扫描电子显微镜 (SEM) 对复合板的界面形貌和拉伸断口形貌进行观察,利用能谱 (EDS) 仪对 Ti/Al 界面两侧合金元素进行扫描分析,利用扫描电子显微镜配套的电子背散射衍射 (EBSD) 技术表

表 1 纯钛 TA1 与 AA6061 铝合金的物理性能参数

Table 1 Physical properties of pure titanium TA1 and aluminum alloy AA6061

Material	Density/g·cm ⁻³	Poisson's ratio	Yield strength/MPa
TA1	4.5	0.3	275
AA6061	2.7	0.34	55

表 2 纯钛板 TA1 和 AA6061 铝合金板化学成分

Table 2 Chemical compositions of pure titanium sheet TA1 and aluminum alloy sheet AA6061 (ω/%)

Material	C	Fe	N	O	H	Al	Ti	Si
TA1	0.06	0.12	0.03	0.15	0.014	-	Bal.	-
AA6061	-	0.73	-	-	-	Bal.	0.12	0.65

表 3 纯钛 TA1 和铝合金 AA6061 力学性能

Table 3 Mechanical properties of pure titanium sheet TA1 and aluminum alloy sheet AA6061

Material	Ultimate tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%
TA1	350	275	25
AA6061	124	55	22

征分析 Ti/Al 复合板界面的微观组织,用 Channel-5 软件对数据进行分析。平行于轧制方向切割拉伸试样,拉伸试验在岛津 AGX-V 系列万能拉伸试验机上进行,拉伸速率为室温条件下 1 mm/min。利用三点弯曲测试评定 Ti/Al 复合板的抗弯能力,选用正弯和背弯 2 种形式,如图 1 所示。利用 HV-1000B 型显微硬度计测量复合板结合界面及其附近位置的显微硬度,下压载荷为 100 g,加载时间为 15 s。

3 结果与讨论

原始板材的金相组织如图 2 所示,图 2a 为 AA6061 铝合金的原始组织,主要为细长的 α 相晶粒和一定量的析出相。图 2b 为 TA1 钛合金的原始组织,为轧后退火态,由不同尺寸的 α 相晶粒组成。

3.1 宏观变形分析

波-平轧与平轧 Ti/Al 复合板模拟宏观形貌如图 3 所示。观察图 3 发现压下率相同时,波-平轧复合板的

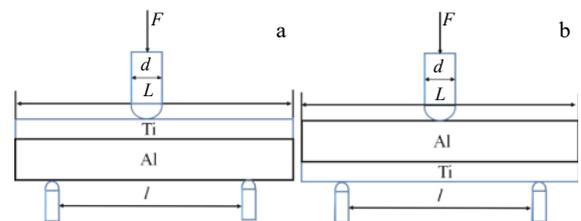


图 1 三点弯曲测试示意图

Fig.1 Schematic diagrams of three-point bending test: (a) titanium side compression and (b) aluminum side compression

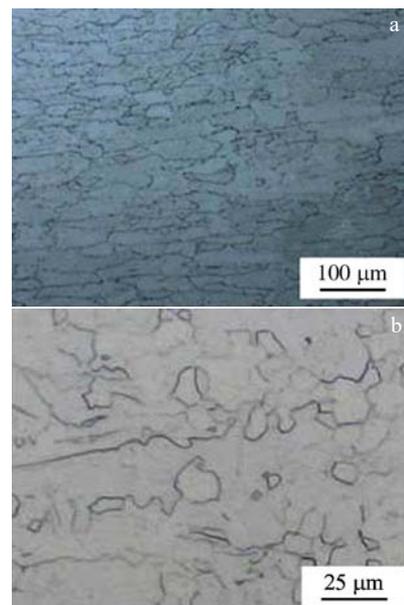


图 2 AA6061 和 TA1 原始板材金相组织

Fig.2 OM images of original sheets: (a) AA 6061 and (b) TA1

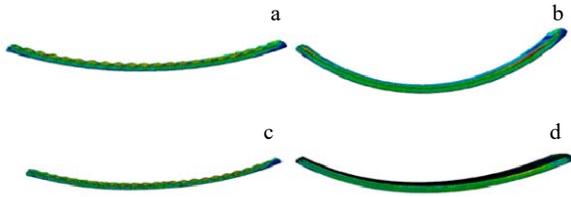


图 3 Ti/Al 复合板模拟宏观形貌

Fig.3 Simulated macroscopic morphologies of Ti/Al laminated plate: (a) B35%, (b) P35%, (c) B40%, and (d) P40%

弯曲变形程度明显低于平轧复合板；平轧复合板压下率增大时弯曲变形程度减小，即压下率 40% 翘曲程度比压下率 35% 的更小。压下率为 40% 的波-平轧与平轧 Ti/Al 复合板宏观形貌如图 4 所示，发现 2 种轧制方式获得的复合板均向 Ti 板侧弯曲，波-平轧复合板的翘曲程度明显小于平轧复合板，与模拟结果相符合。这是由于 Ti 板的变形抗力比 Al 板大^[16]，因此轧后复合板呈弯曲状。波-平轧时变形抗力较大的 Ti 板与表面积较大的波纹辊接触，使得 Ti 板的变形量变大，复合

板的翘曲程度变小；而平轧时 Ti 板和 Al 板均与平轧辊接触，Ti 板的变形量小于 Al 板，因此平轧复合板朝 Ti 板侧翘曲的程度比波-平轧复合板大。另外，当轧制过程中压下率增大时，Ti 板的塑性变形程度随之增大，因此压下率较大的复合板翘曲变形程度减小。

3.2 应变场及应力场分析

等效应变是衡量复合板轧制过程中变形状态的一个重要指标，它能够直接反映复合板界面的结合状况及其变形规律。图 5 为压下率为 40% 时波-平轧和平轧



图 4 Ti/Al 复合板宏观形貌

Fig.4 Macro morphologies of Ti/Al composite plate: (a) P40% and (b) B40%

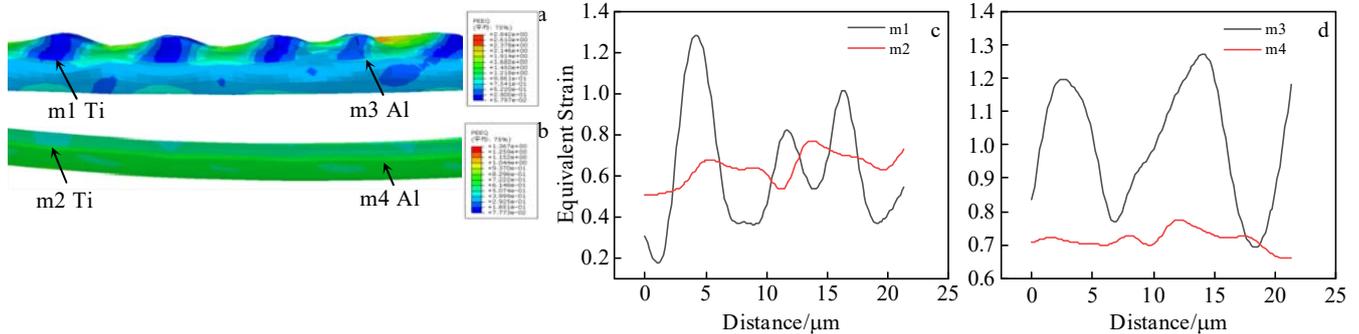


图 5 压下率 40% 时 Ti/Al 复合板等效应变云图及其变化曲线

Fig.5 Equivalent strain cloud diagrams (a-b) and variation curves (c-d) of Ti/Al composite plate with reduction rate of 40%: (a) B40%, (b) P40%, (c) TA1 plate, and (d) AA6061 plate

Ti/Al 复合板的应变云图及变化曲线，其中 m1 为波-平轧界面处 Ti 侧、m2 为平轧界面处 Ti 侧、m3 为波-平轧界面处 Al 侧以及 m4 为平轧界面处 Al 侧的等效应变。观察图 5c、5d 发现波-平轧复合板等效应变呈现波纹状的周期性变化，其中 Ti 板波谷处的等效效应最大，波腰处稍小，波峰处最小 Al 板各个位置的等效应变大小规律与 Ti 板相同，但均小于 Ti 板。波-平轧复合板等效应变总体大于平轧复合板，Al 板一侧更为明显。

图 6 为波-平轧和平轧 Ti/Al 复合板的等效应力云图。从图 6a 中可以看出波-平轧复合板 Ti 板波谷位置的等效应力大于波峰位置，并且呈周期性变化，其 Ti

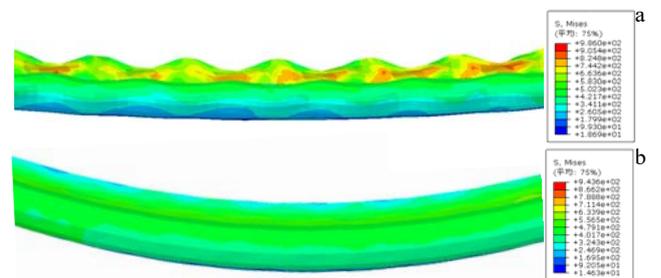


图 6 Ti/Al 复合板等效应力云图

Fig.6 Equivalent stress cloud diagrams of Ti/Al composite plate with reduction rate of 40%: (a) B40% and (b) P40%

板的等效应力大于 Al 板。用图 6b 表明平轧复合板 Ti 层和 Al 层应力都较为均匀。这是由于波纹辊波状造型增加了轧制压力，加剧金属间流动性，最终导致等效应力增大。而平轧复合板的上辊和下辊都为平辊，Ti 层和 Al 层受力较为均匀，因此等效应力也较为均匀。

3.3 界面分析

压下率为 40% 的波-平轧与平轧 Ti/Al 复合板 SEM 形貌如图 7 所示。观察图 7a、7c 可以看出在相同压下率下，波-平轧复合板的结合界面无明显裂纹或明显分层，整体结合良好。如图 7b、7d 所示平轧复合板结合界面局部出现裂纹及孔洞，Ti 层有明显的破碎层，结合效果次于波-平轧复合板。根据模拟结果可知波-平

轧复合板波谷位置处应变较大，这是由于波纹辊轧制过程中 Ti 板承受的轧制力较大，有利于金属硬化层的破裂及暴露出新鲜金属，提高了界面金属的结合能力，从而增强复合板界面的结合，减少裂纹和孔洞的出现^[17]。根据模拟结果发现平轧复合板等效应变低于波-平轧复合板，Ti 金属变形抗力较大，轧制力过低导致表面硬化层破裂不足，内部没有足够的新鲜 Ti 金属暴露出来，因此在平轧辊的压力下 Al 板和 Ti 板实现微弱的物理结合，导致结合界面处有孔洞和裂纹的存在。

图 8 为波-平轧和平轧 Ti/Al 复合板界面的 XRD 图谱，经分析证明界面处为 α -Al 和 α -Ti 相，未产生金属间化合物^[18]。图 9 为波-平轧和平轧 Ti/Al 复合板结合界面形貌及 EDS 线扫描分析结果。Ti/Al 复合板

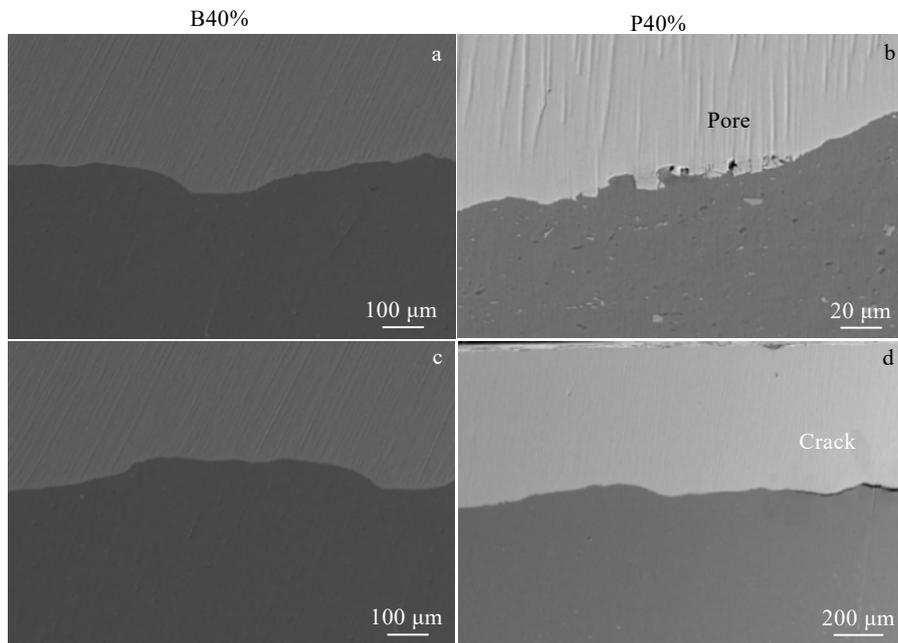


图 7 压下率 40% 的 Ti/Al 复合界面 SEM 形貌

Fig.7 SEM morphologies of Ti/Al composite interface with reduction rate of 40%: (a) wave trough, (b) pore, (c) wave crest, and (d) crack

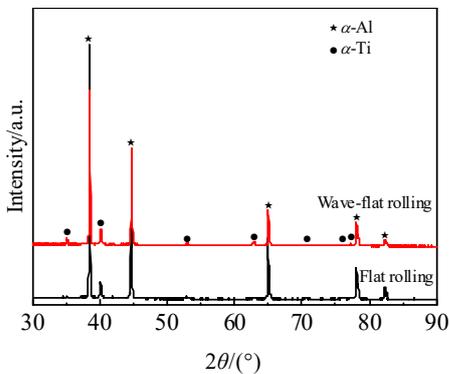


图 8 Ti/Al 复合界面的 XRD 图谱

Fig.8 XRD patterns of Ti/Al composite interface

在不同轧制方式下 EDS 线扫结果均呈 X 状，Ti 和 Al 元素在结合界面两侧连续变化表明复合板发生了元素扩散实现了冶金结合^[19]，并且元素没有发生偏聚。由图 9a、9b 可以发现波-平轧复合板波峰位置处的元素扩散宽度小于波谷位置处的元素扩散宽度，其中波峰和波谷位置处的元素扩散宽度分别为 1.8 和 2.4 μm。这是由于复合板波谷位置压下率较波峰位置大，因此波谷位置的元素扩散层较宽^[20]。平轧复合板结合界面的元素扩散宽度为 1.6 μm，小于波-平轧复合板的元素扩散层宽度。这表明波-平轧复合板的结合强度高于平轧复合板。

对压下率为 40% 的波-平轧和平轧 Ti/Al 复合板进

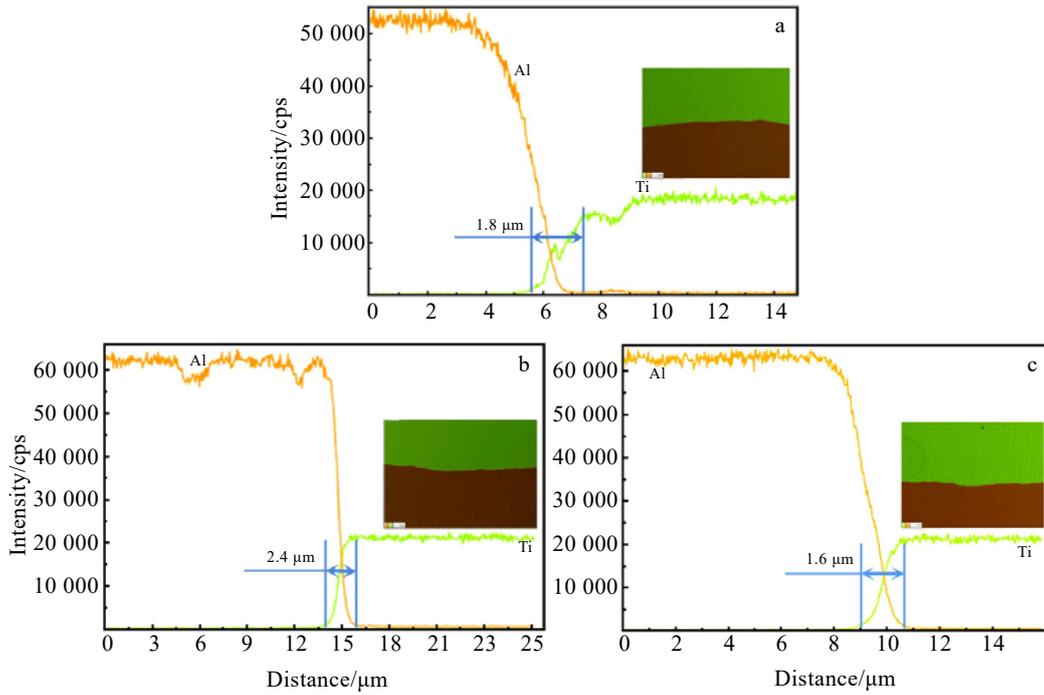


图 9 Ti/Al 复合板结合界面 EDS 元素线扫描

Fig.9 EDS element line scanning of Ti/Al composite plate bonding interface: (a) peak of wave, (b) trough of wave, and (c) flat rolling

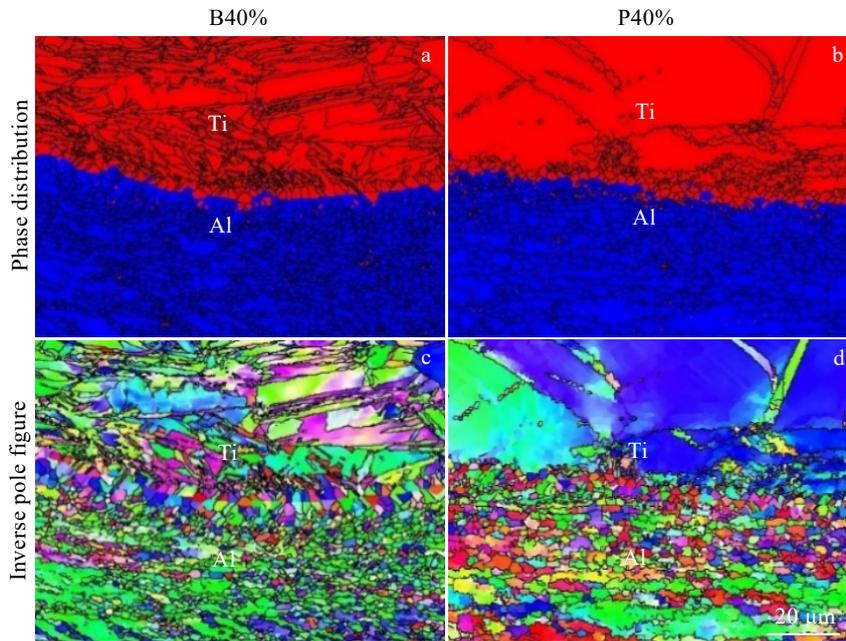


图 10 压下率 40% 的 Ti/Al 复合板 EBSD 照片

Fig.10 EBSD images of Ti/Al composite plate with reduction rate 40%

行 EBSD 分析, 结果如图 10 所示。观察图 10a、10b 发现波-平轧复合板 Ti 层晶粒的尺寸明显小于平轧复合板 Ti 层晶粒的尺寸, 这是由于轧制过程中波-平轧复合板的等效应变大于平轧复合板, 复合界面在大应变的作用下产生的塑性变形程度增大, 使得界面处原

始晶粒破碎, 从而使晶粒尺寸减小^[21]。如图 10c、10d 所示, 波-平轧复合板 Ti 层晶粒从远离界面处的细长状晶粒变成界面附近的等轴晶粒, Al 层晶粒为等轴晶。这是由于 Ti 层板与波纹辊接触, 受到的应力更大, 导致组织中大量位错能的聚集, 为晶粒细化提供了强

大的驱动力^[22]。

波-平轧和平轧复合板再结晶晶粒、亚晶粒及大变形晶粒在结合界面处的分布情况及局部统计结果如图 11 所示。波-平轧复合板 Ti 板主要为大变形晶粒，夹杂少量的亚晶粒。平轧复合板 Ti 板主要为亚晶粒，夹杂少量的大变形晶粒。波-平轧与平轧复合板 Al 层白色框内的统计结果如图 11c、11d 所示，波-平轧中再结晶晶粒最多，其次为大变形晶粒，最少为亚晶粒，占比分别为 49.68%、28.84%、21.48%。平轧复合板中亚晶粒最多，其次为大变形晶粒，最少为再结晶晶粒，占比分别为 44.02%、31.09%、24.89%。

从模拟结果可知波-平轧的等效应变与等效应力都远大于平轧复合板，尤其是 Al 板最为明显，大应力

与大应变为再结晶提供了强大的驱动力，并且观察图 10d 发现 Al 板的晶粒呈锯齿状，此形状为将要发生再结晶时出现的形状，也从侧面说明平轧复合板 Al 板的应力应变值过小，达不到再结晶的程度，因此波-平轧复合板的再结晶程度远大于平轧复合板。2 种轧制方式下的 Ti 板均没有再结晶晶粒，是由于本研究的轧制温度为 300 °C，而 Ti 的再结晶温度远高于该轧制温度，因此 Ti 板并没有出现再结晶晶粒^[23]。

3.4 力学性能

图 12 为波-平轧和平轧 Ti/Al 复合板沿轧制方向进行拉伸试验后得到的应力-应变曲线，其中波-平轧复合板抗拉强度为 182.74 MPa，延伸率为 5.56%，退火后的波-平轧复合板的抗拉强度略微降低，为 177.32 MPa，

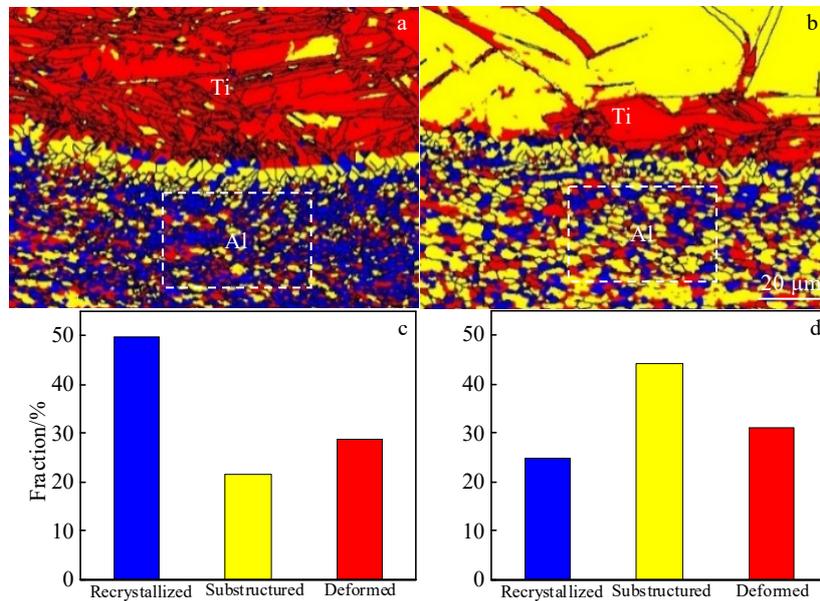


图 11 压下率 40% 的 Ti/Al 复合板再结晶晶粒、亚晶粒及大变形晶粒的形貌及占比

Fig.11 Morphologies (a-b) and fraction (c-d) of recrystallized grain, substructured grain, and deformed grain of Ti/Al composite plate with reduction rate of 40%: (a, c) B40% and (b, d) P40%

但延伸率增加到 9.10%。平轧复合板抗拉强度为 159.08 MPa，延伸率为 14.32%，退火后的抗拉强度变为 154.88 MPa，延伸率明显改善，增加到 22.60%，具体数据如表 4 所示。波-平轧复合板的抗拉强度大于平轧复合板，但是其延伸率低于平轧复合板。波-平轧复合板的波纹状结合界面形貌增大了结合面积，促进了界面结合强度，高抗拉强度是因为复合板在波-平轧制过程中由于大应力的作用，晶粒得到细化，进而导致其抗拉强度得到提升。波-平轧复合板的延伸率较低是由于在拉伸过程中随着应变的增加，加工硬化程度增加，在抗拉强度达到最大值后并不能维持，造成回落断裂^[24]。而退火过程可以明显释放残余应力，导致塑

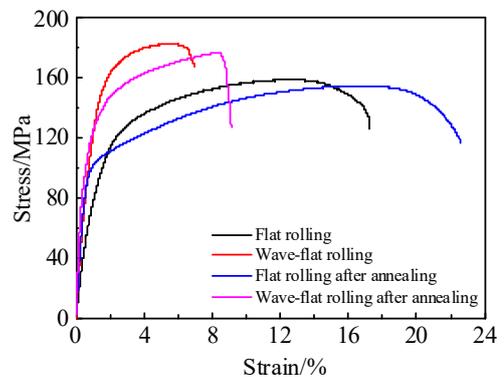


图 12 Ti/Al 复合板应力-应变曲线

Fig.12 Stress-strain curves of Ti/Al composite plate

表 4 Ti/Al 复合板拉伸测试结果

Table 4 Tensile test results of Ti/Al composite plate

Material	Ultimate tensile strength/MPa	Elongation/%
Wave-flat rolling	182.74	5.56
Wave-flat rolling after annealing	177.32	9.10
Flat rolling	159.08	14.32
Flat rolling after annealing	154.88	22.60

性提升，而强度略微降低。

利用扫描电镜对波-平轧与平轧复合板拉伸断口形貌进行观察，其结果如图 13 所示。由图 13a、13b 可以看出波-平轧复合板结合界面的开裂程度小于平轧复合板，说明波-平轧复合板界面结合强度更大。观察图 13c、13e 发现波-平轧复合板 Ti 板断口韧窝分布密集且广泛，相较于 Al 板韧窝更深，韧窝周围有较薄的撕裂棱出现，是明显的韧窝聚集性韧性断裂；观察

图 13d、13f 发现平轧复合板 Ti 板韧窝较浅，属于韧性断裂，Al 板除有韧窝存在之外还有片层状形貌出现，说明 Al 板一部分区域发生了脆性断裂。

对 Ti/Al 波-平轧与平轧复合板进行弯曲性能试验，其结果如图 14 所示。可以看到波-平轧与平轧复合板正弯试样均无明显开裂，波-平轧复合板背弯试样有明显裂缝出现，平轧复合板背弯试样开裂严重，一部分 Ti 层与 Al 层结合界面完全分离。原因是正弯时变形抗力较小的 Al 板受到向外应力，变形抗力较大的 Ti 板受到向内的应力，此时协调了 Ti 板和 Al 板的变形量，从而表现出良好的弯曲性能。而背弯时与正弯受力情况完全相反，Ti 板在向外的应力作用下无法与 Al 板保持协调变形，因此发生开裂乃至完全分离。

通过显微硬度测试得到 Ti/Al 波-平轧与平轧复合板显微硬度分布图，其结果如图 15 所示。波-平轧复合板波谷处平均显微硬度高于波峰处，这是因为波谷

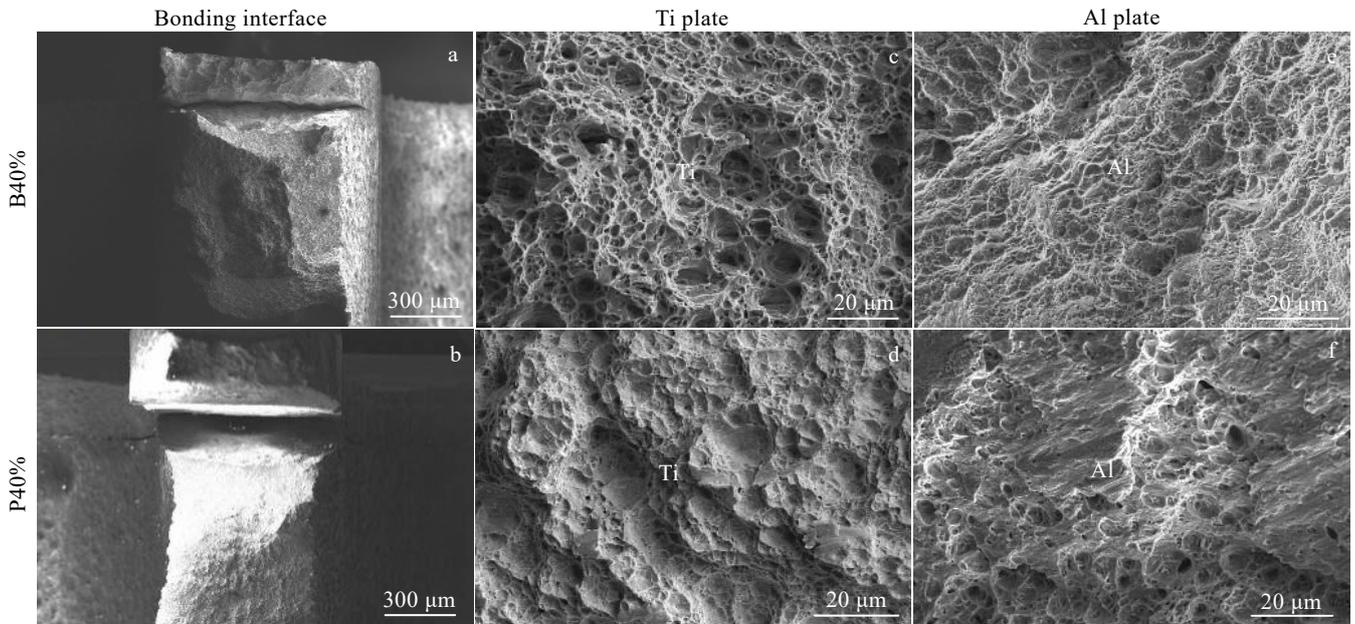


图 13 压下率 40%的 Ti/Al 复合板拉伸断口形貌

Fig.13 Tensile fracture morphologies of Ti/Al composite plate with reduction rate of 40%

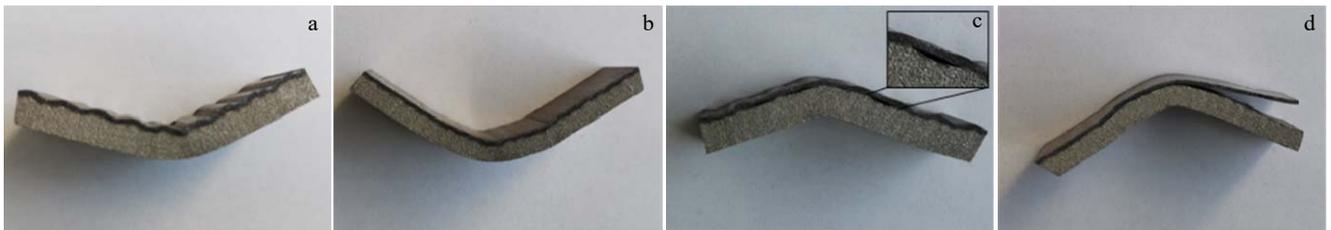


图 14 Ti/Al 复合板三点弯曲宏观试样

Fig.14 Macroscopic appearances of three-point bending specimens of Ti/Al composite plate: (a) corrugated positive bend, (b) flat rolled position bend, (c) corrugated back bend, and (d) flat rolled back bend

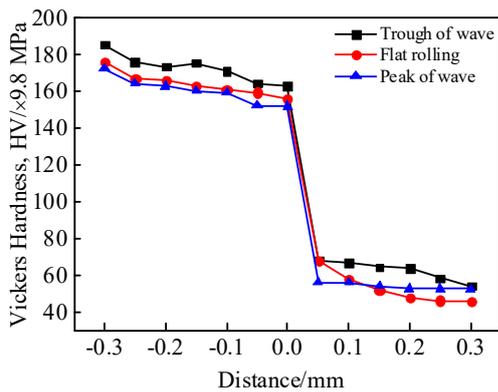


图15 Ti/Al复合板显微硬度

Fig.15 Microhardness of Ti/Al composite plate

处对应波纹辊的波峰处,受到的应变最大,加工硬化作用最为显著,导致显微硬度增大。结合界面 Ti/Al 2种金属相互扩散,所产生的扩散层使得界面处的显微硬度小于 Ti 板而大于 Al 板。

4 结论

1) 根据有限元模拟结果发现,当轧制压下率为40%时, Ti/Al 复合板翘曲程度比压下率为35%时小,另外波-平轧复合板的翘曲程度小于平轧复合板,波-平轧复合板等效应力应变大于平轧复合板,其结合界面为波纹状的三维结合,而平轧复合板为简单的二维结合。

2) 波-平轧复合板结合界面无孔洞、裂纹等缺陷,波峰处扩散层厚度为 1.8 μm ,波谷处为 2.4 μm ,平轧复合板结合界面存在缺陷,扩散层厚度为 1.6 μm ,小于波-平轧复合板,界面处无金属间化合物产生。

3) 波纹辊促进波-平轧复合板的变形,其晶粒尺寸小于平轧复合板,并且其 Al 板的再结晶程度远大于平轧, Ti 板由于轧制温度较低,未发生再结晶。

4) 波-平轧与平轧复合板断裂类型均为韧性断裂,由于大应力应变作用,波-平轧复合板晶粒较为细小,但也导致出现加工硬化,因此抗拉强度为 182.74 MPa,延伸率为 5.56%,平轧复合板抗拉强度为 159.08 MPa,延伸率为 14.32%,退火后轧制过程的残余应力释放,导致板材延伸率提高而强度略微降低;波-平轧复合板的抗弯性能及硬度均优于平轧复合板。

参考文献 References

[1] Yu Y, Chen R, Li C L *et al.* *Materials Research Express*[J], 2008, 7: 096 520
 [2] Zhang Jin(张瑾), Zhu Peixian(竺培显), Dai Jianqing(代建

清) *et al.* *Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报)[J], 2013, 27(6): 597

- [3] Xie Hongbiao(谢红飙), Chen Nan(陈楠), Liang Shujie(梁树杰) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2022, 32(8): 2231
 [4] Xiao Hong(肖宏), Xu Pengpeng(许朋朋), Qi Zichen(祁梓宸) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2020, 56(2): 231
 [5] Wang P J, Chen Z J, Huang H T *et al.* *Chinese Journal of Aeronautics*[J], 2021, 34(8): 192
 [6] Zhang Ting(张婷), Xu Hao(许浩), Li Zhongjie(李仲杰) *et al.* *Chinese Journal of Engineering*(工程科学学报)[J], 2021, 43(1): 67
 [7] Bataev I A, Bataev A A, Mali V I *et al.* *Materials and Design*[J], 2012, 35: 225
 [8] Fan Minyu(范敏郁), Guo Xunzhong(郭训忠), Cui Sheng-qiang(崔圣强) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(3): 770
 [9] Liu Huan(刘环), Zheng Xiaoran(郑晓冉). *Material Reports* (材料导报)[J], 2012, 26(S2): 13
 [10] Fan M Y, Luo Z F, Fu Z X *et al.* *Vacuum*[J], 2018, 154: 101
 [11] Liu Xiaotao(刘晓涛), Zhang Ting'an(张延安), Cui Jianzhong(崔建忠). *Material Reports*(材料导报)[J], 2002, 16(7): 41
 [12] Han Jianchao(韩建超), Liu Chang(刘畅), Jia Yi(贾懿) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2020, 30(6): 1270
 [13] Chaudhari G P, Acoff V. *Composites Science and Technology*[J], 2009, 69: 1667
 [14] Qi Z C, Xiao H, Yu C *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2019, 44: 133
 [15] Xiao H, Qi Z C, Yu C *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2017, 249: 285
 [16] Sun W, Yang F, Kong F T *et al.* *Materials Characterization*[J], 2018, 144: 173
 [17] Guo Miao(锅渺), Li Sha(李莎), Zhao Liping(赵利平) *et al.* *Material Reports*(材料导报)[J], 2020, 34(22): 220 87
 [18] Zhang N, Wang W X, Cao X Q *et al.* *Materials and Design*[J], 2015, 65: 1100
 [19] Xu Hebin(许贺彬), Ma Min(马旻), Tan Jinlin(谭锦麟) *et al.* *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2020, 27(10): 33
 [20] Ma M, Huo P, Liu W C *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2015, 636: 301
 [21] Shen Hongzhuo(申宏卓), Liu Yuanming(刘元铭), Liu Yanxiao(刘延啸) *et al.* *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2021, 32(22): 2731

- [22] Chung C Y, Zhu M, Man C H. *Intermetallics*[J], 2002, 10: 865
- [23] Chen X F, Tang B, Liu D *et al. Materials Characterization*[J], 2021, 179: 111 332
- [24] Liu Chang(刘畅), Jia Yi(贾焱), Li Sha(李莎) *et al. Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2020, 27(12): 66

Interfacial Microstructure and Properties of Ti/Al Composite Plate by Wave-Flat Rolling

Li Yajie, Ma Chengrui, Liu Cuirong, Zhu Zhiyuan, Zhang Peilin

(School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The finite element simulation of wave-flat rolling and flat rolling of Ti/Al composite plate was established and carried out. Effects of different rolling modes on the microstructure and mechanical properties of the composite plate were analyzed. The results show that the warpage degree of the composite plate with reduction rate of 40% is lower than that with reduction rate of 35%, the equivalent stress and strain of the wave-flat-rolled composite plate are larger than those of the flat-rolled composite plate, and no holes and cracks are found in the bonding interface. The thickness of the interfacial diffusion layer at the crest of the wave is 1.8 μm , and that at the trough is 2.4 μm , while the thickness of the interfacial diffusion layer of the flat-rolled composite plate is 1.6 μm . The degree of recrystallization of the wave-flat-rolled composite plate Al plate is higher than that of flat-rolling, and its tensile strength, bending resistance, and hardness are also higher than those of the flat-rolled composite plate, but the elongation is lower due to work hardening.

Key words: Ti/Al composite plate; finite element simulation; wave-flat rolling; mechanical properties

Corresponding author: Liu Cuirong, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, Tel: 0086-351-2161126, E-mail: s20201421039@stu.tyust.edu.cn