

引文格式: 张 鹏, 宁少波, 王 涛, 等. 退火温度对 TA1/TC4 波纹轧复合板力学性能及微观组织的影响 [J]. 塑性工程学报, 2025, 32 (2): 194–202. ZHANG Peng, NING Shaobo, WANG Tao, et al. Influence of annealing temperature on mechanical properties and microstructure of TA1/TC4 corrugated rolled composite plates [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2025, 32 (2): 194–202.

退火温度对 TA1/TC4 波纹轧复合板力学性能及 微观组织的影响

张 鹏^{1,2}, 宁少波³, 王 涛^{2,3}, 任忠凯^{2,3}, 赵 浩³, 刘文文^{2,3}, 郭继保⁴

(1. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学 先进金属复合材料成形技术与装备教育部工程研究中心, 山西 太原 030024;

3. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024;

4. 太原通泽重工有限公司, 山西 太原 030024)

摘 要: 对波纹轧制工艺制备得到的 TA1/TC4 复合板进行轧后退火研究, 通过拉伸、拉剪测试以及界面微观组织表征, 研究了退火温度对波纹热轧 TA1/TC4 复合板变形失效行为的作用机制。结果表明, 低温退火 (350~450 ℃) 时, 复合板基材的静态回复程度较低, 复合板内部的加工硬化现象仍较明显, 导致复合板韧性能力提升不明显, 随着退火温度的升高, 复合板塑性改善明显。当退火温度高于 500 ℃ 时, 复合板的拉伸和剪切性能下降明显, 对复合板的综合力学性能存在不利影响。力学性能测试结果表明, 在 500 ℃, 1 h 的退火条件下, 复合板的综合力学性能最佳, 此时屈服强度为 802.3 MPa, 剪切强度为 366.54 MPa, 伸长率接近 10.5%。

关键词: 波纹轧制; TA1/TC4 复合板; 退火温度; 力学性能; 界面微观组织

中图分类号: TTG156.2; TTG335.81 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2025) 02-0194-09

doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2025.02.023

Influence of annealing temperature on mechanical properties and microstructure of TA1/TC4 corrugated rolled composite plates

ZHANG Peng^{1,2}, NING Shao-bo³, WANG Tao^{2,3}, REN Zhong-kai^{2,3},

ZHAO Hao³, LIU Wen-wen^{2,3}, GUO Ji-bao⁴

(1. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Engineering Research Center of Ministry of Education for Advanced Metal Composite Forming Technology and Equipment, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

3. School of Mechanical and Transportation Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

4. Taiyuan Tongze Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan 030024, China)

Abstract: Post-roll annealing study on TA1/TC4 composite plates prepared by corrugated rolling was carried out, and the mechanism of the role of annealing temperature on the deformation failure behavior of corrugated hot-rolled TA1/TC4 composite plates was investigated by tensile, tensile shear tests and the interface microstructure characterization. The results show that the static recovery degree of composite plates substrate is low at low temperature annealing (350–450 ℃), the work hardening phenomenon in composite plates is still obvious, resulting in the enhance of toughness and plasticity ability of composite plates is not obvious, with the increase of annealing temperature, the plasticity of composite plates improves obviously. When the annealing temperature is higher than 500 ℃, the tensile and shear properties of composite plate decline obviously, which has adverse effects on the comprehensive mechanical properties of composite plates.

基金项目: 山西省优秀青年基金资助项目 (202303021224002); 中央引导地方科技发展资金资助项目 (YDZJSX2022A023); 中国博士后特别资助 (站中) 项目 (2023T160474)

第一作者: 张 鹏 (通信作者), 男, 1987 年生, 博士, 副教授, 主要从事塑性成形、轧制工艺及设备、搅拌摩擦焊研究, E-mail: jluvip@sina.com

收稿日期: 2024-03-14; **修订日期:** 2024-12-06

Mechanical performance test results show that under the annealing condition of 500 °C and 1 h, the comprehensive mechanical properties of composite plates are the best with the yield strength of 802.3 MPa, shear strength of 366.54 MPa, and the elongation is close to 10.5%.

Key words: corrugated rolling; TA1/TC4 composite plates; annealing temperature; mechanical property; interface microstructure

引言

随着科技不断发展,单一金属材料的性能已经越来越难以满足日益提升的生活和生产需求。将两种及以上不同性质的金属板坯结合制备金属复合板,可兼具金属母材的综合性能^[1-3]。TA1工业纯钛质轻、比强度高、韧塑性较好且成本较低^[4],将其与高强度的TC4钛合金^[5]复合,成品兼具两者优势,在航空航天、航海、化工及氢能领域均有广泛的应用前景。

金属复合板的常见制备方法主要有爆炸复合、扩散焊、喷射沉积和轧制复合。相比其他方法,通过轧制生产复合板具有生产连续化、低成本、环保、界面缺陷少且性能稳定等优势^[6-8],但传统的平辊轧制复合板存在异种金属基板结合难、结合强度低和板形质量差等一系列问题^[9]。为此,波纹轧+平轧工艺应运而生,首道次波纹轧可传递更大的轧制力至复合板界面处,使界面材料的变形程度增大并形成凹凸起伏的立体结合界面,异材界面结合面积增大,波纹轧界面独特的受力状态促使界面氧化层破裂,裸露的新鲜金属增多,利于异种金属结合。上述优势均显著提升了复合板界面的结合强度并降低了轧制力,且板型的平直度更高。波纹轧过程中,界面部分区域受到更大的轧制力,导致残余应力和加工硬化现象更显著,复合板韧塑性较差。此外,波纹轧界面可分为波峰、波腰和波谷,不同位置受力状态的差异,造成了残余应力和加工硬化状态不同,界面结合强度分布存在差异,亟待通过热处理的方式降低界面残余应力、加工硬化及应力状态差异程度,提升复合板韧塑性,提高界面结合强度并改善微观组织。

王壮^[10]采用异温轧制制备了TC4/7075Al复合板,并对其进行轧后退火研究,研究表明,当退火温度为450 °C、保温时间为3 h时,复合板界面结合效果最好,剪切强度达到峰值149.49 MPa,且拉伸强度达到830 MPa,伸长率达到最大值。郭雷明等^[11]对采用铸轧法制备得到的钛铝复合板进行不同工艺的退火处理,分析认为,随着温度的升高以及保温时间的延长,复合材料的剥离强度出现略微下降,且退火后界面发现了金属间化合物,硬脆金属间化合物数量的增加对复合板的结合产生了不

利影响。LÜ S S等^[12]在660 °C退火1 h提高了钛铁复合板的力学性能,研究发现,退火后复合材料塑性提升,各向异性降低,界面表现出良好的粘接性能,尽管界面剥离强度显著降低,但并未发生界面分层现象。ZHAO Z等^[13]通过热轧复合法制备得到钛/钢复合板,将其在550 °C条件下退火3 h,结果表明,退火处理不但降低了复合板的位错密度和局部应变,而且促进了脆性化合物的生长,这导致复合板拉伸强度和剪切强度明显降低,但伸长率相对较高。李亚杰等^[14]通过“波纹轧+平轧”在300 °C下制备得到了Ti/Al复合板,后续在300 °C条件下退火30 min,研究发现,退火后“波+平”轧复合板的抗拉强度略微降低,但伸长率改善明显,由5.56%提升至9.10%,表明退火后轧制过程中残余应力释放,导致板材伸长率提高而强度略微降低。陈文欢^[15]研究了在500 °C条件下退火1 h对波纹界面Al/Ti/Al复合板的影响,结果表明,退火后复合材料的屈服强度明显下降,35%压下率下Al/Ti/Al复合板TD和RD方向的伸长率达到55%以上,说明过高的退火温度对复合板的综合性能产生了不利影响。然而目前对于钛/钛复合板轧制及热处理工艺的研究鲜有报道。

制定合适的退火工艺制度可以有效地改善复合板的加工硬化现象、促进基材回复、消除轧制过程中的残余应力并促进原子间相互扩散,对提高复合板的塑性有着显著的影响^[16]。为此,本文针对首道次波纹轧,二道次平轧制备的TA1/TC4复合板,着重研究退火温度对复合板性能及组织的影响,分析退火温度对复合板结合界面形貌、拉伸和剪切性能的影响规律,研究不同退火温度对复合板变形失效行为的作用机制,明确适合“波+平”轧TA1/TC4复合板的退火温度。

1 退火温度对复合板的界面微观形貌影响

研究针对900 °C,波纹轧44%压下量,平轧20%压下量的TA1/TC4复合板,该条件下复合板基材变形剧烈,加工硬化程度和残余应力均较大,界面结合性能优良,对热处理条件敏感。本文设定退

火温度分别为 350、400、450、500、550 和 600 ℃，退火保温时间为 1 h，探究退火温度对界面结合情况的影响。首先使用电子扫描显微镜对 TA1/TC4 复合板在不同退火温度下的结合界面进行表征。

选取原始复合板坯和退火温度 400、500 和 600 ℃，退火时间为 1 h 条件下 TA1/TC4 复合板结

合界面的 SEM 图像进行对比分析，如图 1 所示，各退火条件下 TA1/TC4 复合板界面不同位置包括波峰、波腰及波谷处的界面均结合良好，没有出现明显的结合缺陷，较原始未处理复合板坯没有明显变化，说明对 TA1/TC4 复合板进行去应力退火后并未使得界面出现孔洞等缺陷。

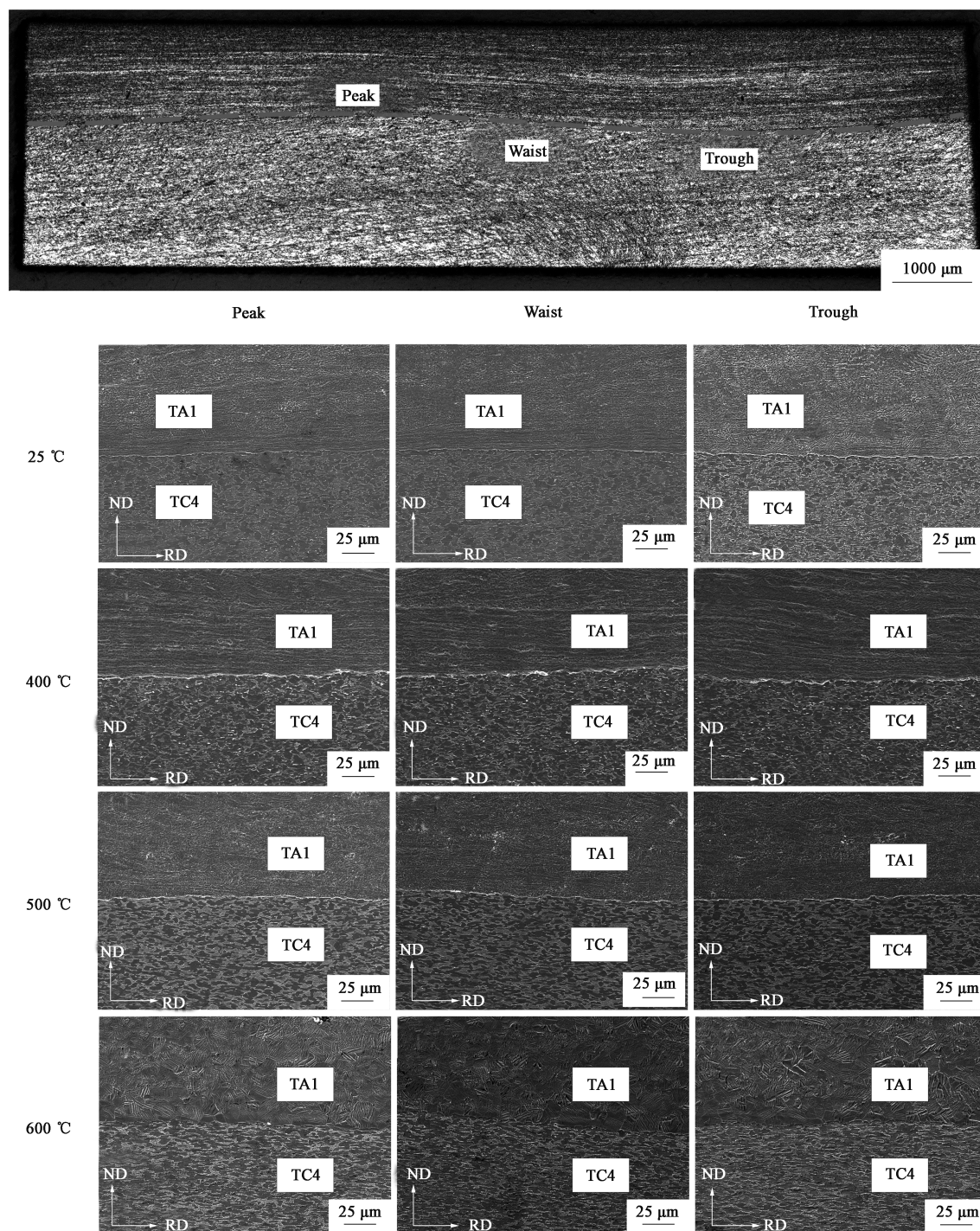


图 1 “波+平”轧 TA1/TC4 复合板在不同退火温度下结合界面 SEM 表征结果

Fig. 1 SEM characterization results of bonding interface of “corrugated+flat” rolled TA1/TC4 composite plates at different annealing temperatures

进一步对结合界面进行 EDS 线扫描，如图 2 所示。由图可知，较退火处理前，退火后复合板界面

扩散层均明显增厚,温度为400℃时,波峰、波腰和波谷位置的扩散层厚度由2.4、2.3和2.6μm分别增大至2.8、3.0和3.4μm,且随着退火温度的提高,扩散层厚度呈现递增的趋势,当退火温度为600℃时,复合板波峰、波腰和波谷位置的扩散层厚度已提高至3.1、3.2和4.0μm,说明退火温度对复合板的扩散层厚度影响较为显著,不同温度对

应线扫描曲线均呈“X”形,扩散层没有明显的平层,表明界面并未生成大量的金属间化合物。此外,随着温度的升高,复合板界面处元素扩散能力逐渐增强,复合板波谷位置元素扩散随温度的变化更明显,该位置扩散层厚度的增加也更加显著。结合面线扫结果可在一定程度上反映出界面的物相特征,对确定合理的退火温度具有较高的参考意义。

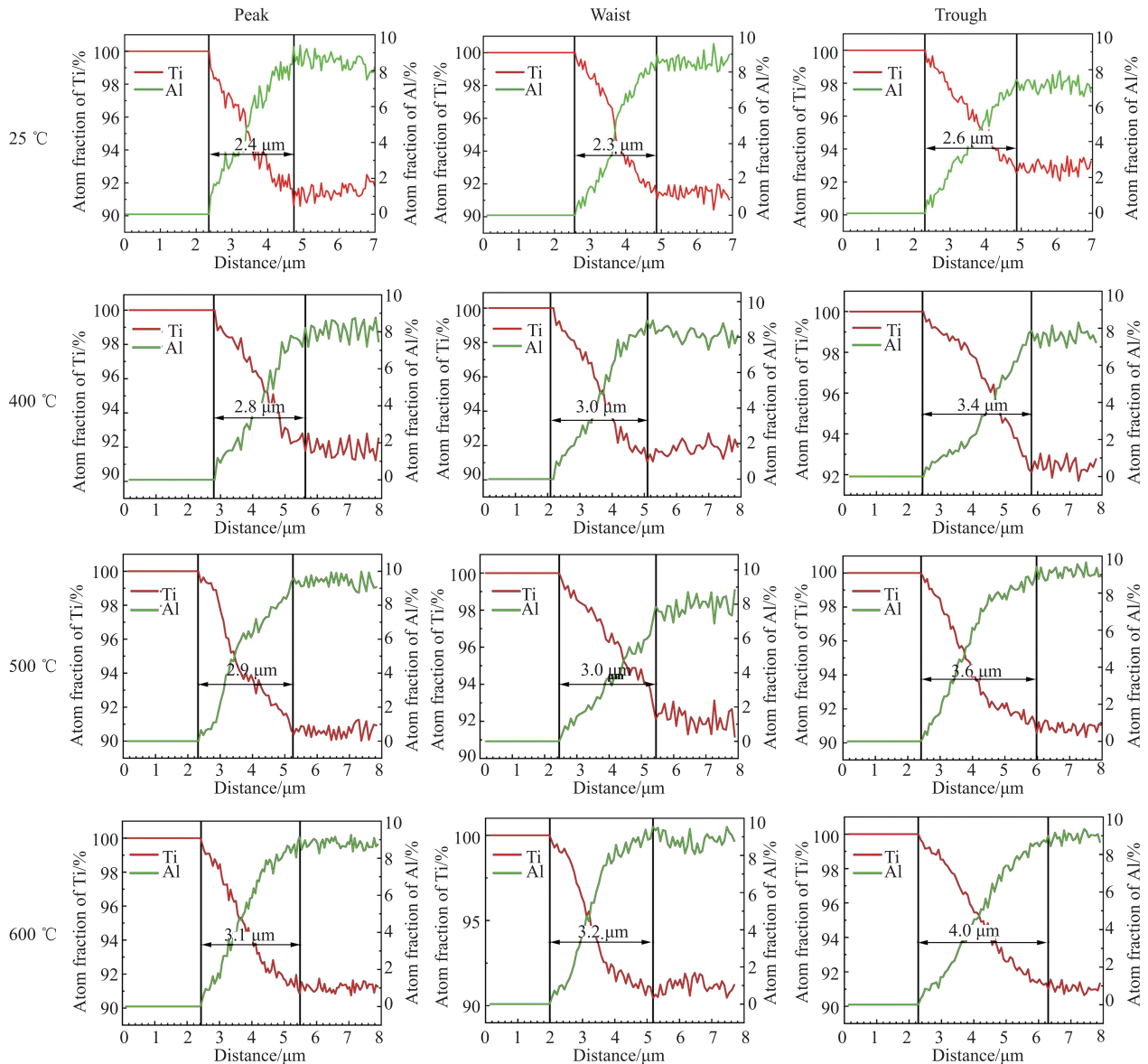


图2 “波+平”轧TA1/TC4复合板在不同退火温度下面EDS线扫描结果

Fig. 2 Interfacial EDS line scanning results of “corrugated+flat” rolled TA1/TC4 composite plates at different annealing temperatures

2 退火温度对复合板力学性能及断口形貌的影响

2.1 力学性能

图3为不同退火温度下复合板单轴拉伸应力应

变曲线图,图中示出,当退火温度为350℃时,复合板的屈服强度为865.8 MPa,伸长率为7.8%;当退火温度为400℃时,屈服强度为859.3 MPa,伸长率为7.7%;当退火温度为450℃时,屈服强度降低至823.3 MPa,伸长率提升至8.2%。分析认为,较低温度退火时,复合板的屈服强度以及伸长率变

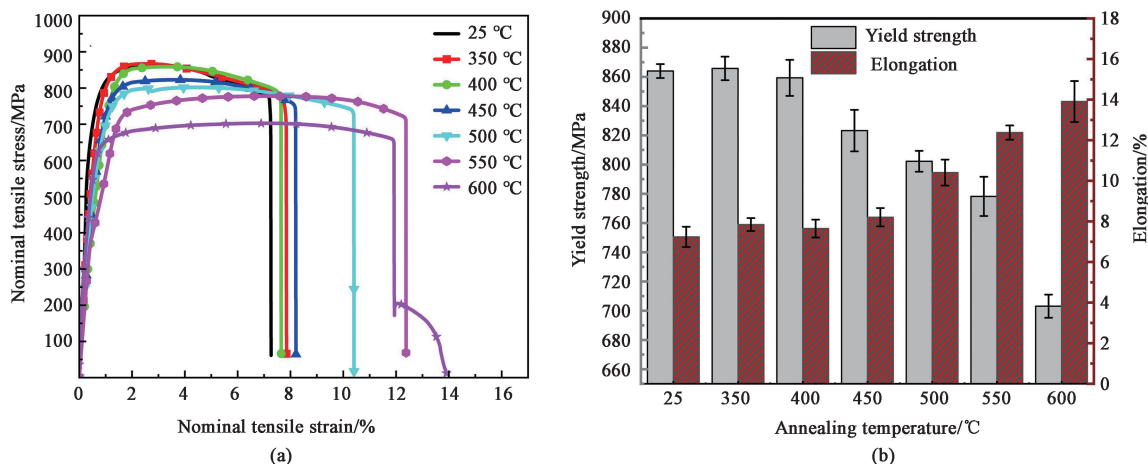


图3 “波+平” 轧 TA1/TC4 复合板在不同退火温度下名义应力-名义应变曲线 (a) 和拉伸性能参数 (b)

Fig. 3 Nominal stress-nominal strain curves (a) and tensile property parameters (b) of “corrugated+flat” rolled TA1/TC4 composite plates at different annealing temperatures

化较小, 且两侧基体塑性协调性较好, 未发生明显的分层断裂现象 (图 4)。当退火温度继续升高至 500 °C, 复合板的屈服强度降低至 802.3 MPa, 伸长率明显提升至 10.5% 左右, 复合板界面出现轻微的分层断裂现象 (图 4)。当退火温度提升至 550 °C 时, 复合板的屈服强度进一步下降至 778.2 MPa, 伸长率提升至 12.3%。当退火温度提升至 600 °C 时, 屈服强度显著降低至 703.1 MPa, 结合图 3a 中 600 °C 对应的应力-应变曲线可知, TC4 侧基体伸长率为 11.9% 左右, TA1 侧基体伸长率为 13.9% 左右, 两侧基体塑性协调性变差, 从图 4 中可以看到明显的分层现象。

结果表明, 随着退火温度的升高, TA1/TC4 复合板屈服强度呈下降趋势, 而伸长率则呈上升趋势, 塑性变形能力得到提升。在 450 °C 较低温度下, TA1/TC4 复合板的屈服强度和伸长率变化不大, 出现这种情况的主要原因是复合板在轧制过程中的加工硬化现象严重, 低温退火不能有效地去除复合板内部的残余应力^[17], 回复程度较低。直至温度提升至 500 °C 时, 复合板的伸长率得到明显提升, 继续提升温度, 可有效改善复合板的加工硬化现象, 回复程度较高, 导致复合板软化。但超过 500 °C 后, 过高的退火温度导致两侧金属基体的回复程度相差较大, 不利于复合板变形协调。

2.2 拉伸断口形貌

图 4 为复合板在不同退火温度下 TA1/TC4 复合板的拉伸断口形貌。由图可知, 原始板坯和退火温度为 400 °C 时, 结合界面均无宏观裂口, 说明复合板仍保持着良好的结合现象。但当温度升高至

500 °C 时, 界面出现裂口, 继续升温至 600 °C, 裂口加深, 两侧金属变形协调性变差, 与图 3a 所示拉伸曲线结果吻合。且可以明显观察到, 随着退火温度的升高, TA1 纯钛侧及 TC4 钛合金侧的颈缩现象越来越明显, 且两侧拉伸断口表面随着温度的提升均出现了纤维状特征, 说明基体塑性能力得到明显提升。当退火温度为 500 °C 时, 此时 TC4 侧韧窝的尺寸和深度相对变大, 数量变少, 且 TA1 侧开始出现一些细小韧窝特征, 解理特征仍存在但相对变少, 说明在该退火温度条件下, TA1 侧加工硬化现象得到改善, 该侧发生静态回复, 复合板塑性得到改善。当温度提升至 600 °C 时, TC4 和 TA1 侧韧窝尺寸和深度均明显变大, 塑性改善明显。随着退火温度提高至 500~600 °C, 可以发现 TA1 侧有明显的颈缩现象且两侧韧窝形状大小有较大的差别, 且复合板整体塑性能力受 TA1 侧基体塑性的变化影响较大。

分析两侧基体韧窝变化, 可以发现, 原始轧制态板坯 TC4 侧断口基本被等轴韧窝覆盖, TA1 侧存在脊状和解理台阶, 由于原始板坯是在 900 °C, 44% 压下量的条件下制备, TA1 侧发生了剧烈的塑性变形, 导致其加工硬化严重, 断口的韧性断裂特征不明显。当退火温度为 400 °C 时, TC4 侧仍呈现出大量等轴韧窝, TA1 侧则呈现明显的河流花样、舌状花样以及解理台阶等解理断裂特征, 两侧断口特征均与轧制态相近, 与前述分析一致, 复合板的塑性能力没有明显的提升。这也是 TA1/TC4 复合板的拉伸应力-应变曲线在此退火温度区间内伸长率没有明显提升的原因。

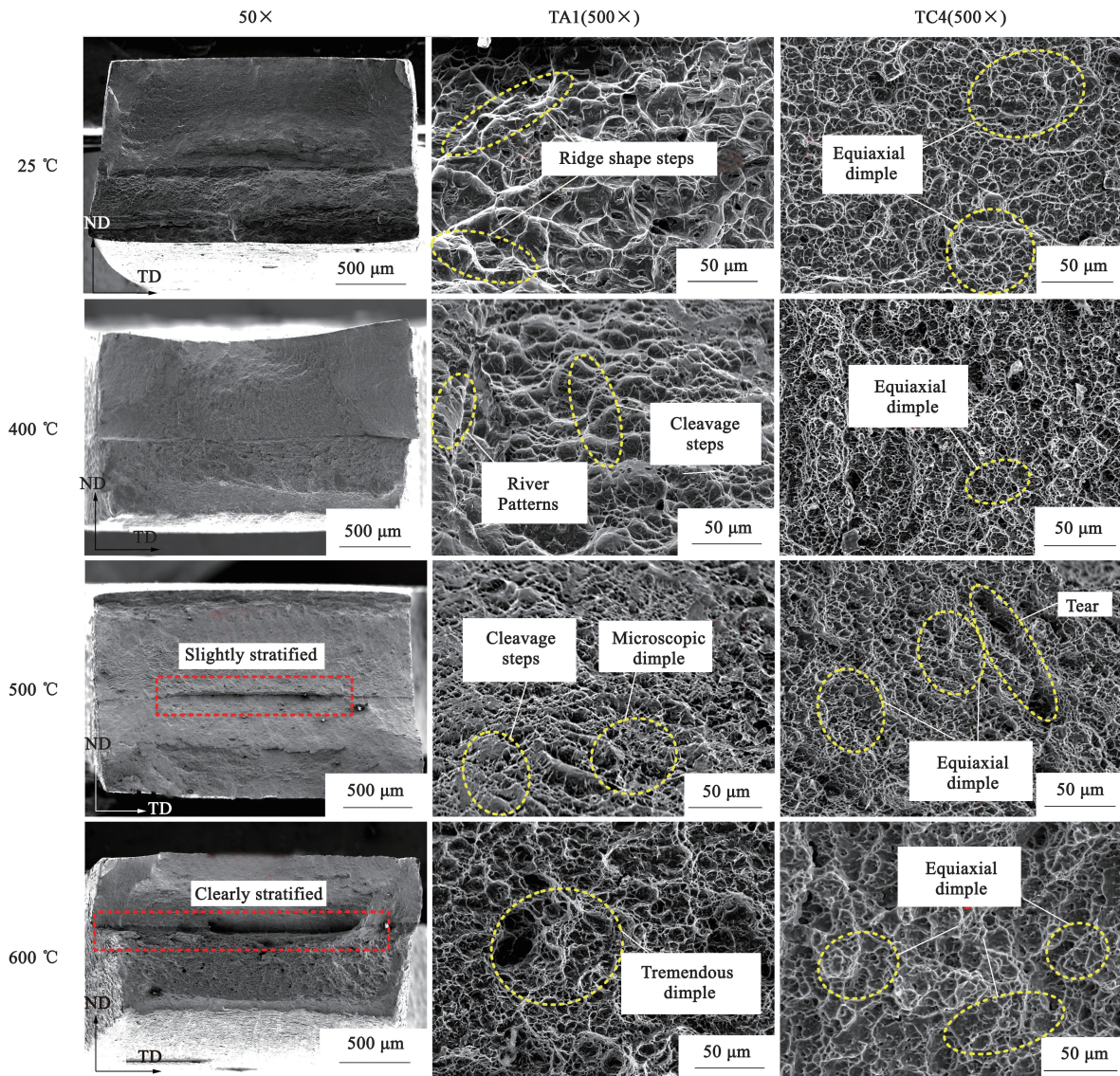


图4 “波+平”轧 TA1/TC4 复合板在不同退火温度下的拉伸断口形貌

Fig. 4 Tensile fracture morphologies of “corrugated+flat” rolled TA1/TC4 composite plates at different annealing temperatures

3 退火温度对复合板剪切性能及断口形貌的影响

3.1 剪切性能

将不同退火温度的 TA1/TC4 复合板进行拉剪实验，图 5 为不同退火工艺下 TA1/TC4 复合板的界面剪切强度柱状图。由图可知，随着退火温度的增加，TA1/TC4 复合板界面剪切强度随之下降。当退火温度为 350 °C 时，复合板界面剪切强度为 413.28 MPa，相比轧制态复合板界面结合强度 457.65 MPa 下降明显；当退火温度从 400 °C 增加到 600 °C 时，复合板界面剪切强度从 391.14 MPa 逐渐下降至 301.27 MPa。

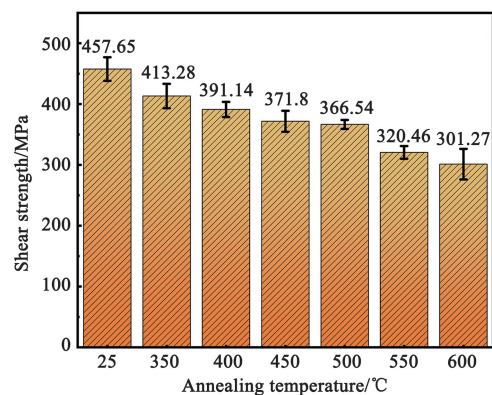


图5 “波+平”轧 TA1/TC4 复合板在不同退火温度下的界面剪切强度

Fig. 5 Interfacial shear strength of “corrugated+flat” rolled TA1/TC4 composite plates at different annealing temperatures

结果表明,退火温度对于 TA1/TC4 复合板的界面结合强度影响较大,随着退火温度的升高,复合板界面剪切强度下降明显,造成该现象的原因主要是基材抗剪强度会随着退火温度的升高而降低,但界面扩散层厚度则会增大,均会导致复合板抗剪强度降低。

3.2 剪切断口形貌

为了进一步研究 TA1/TC4 复合板的抗剪性能与退火温度的关系,将 TA1/TC4 复合板剪切试样断口进行表征和元素扫描分析。TA1 和 TC4 两种材料元素组分差别较小,但 TC4 钛合金中的 Al 和 V 元素是 TA1 纯钛中没有的,因此,选取 Ti、Al 和 V 这 3 种元素对剪切断面两侧进行 EDS 面扫描,其中 Al 和 V 元素的分布特征可以区分断口形成的位置。表 1 为不同退火温度对应复合板剪切断口的元素面扫描结果,可以发现,两侧断口 Al 和 V 元素比例仍接近 0%,说明剪切试样断口断裂位置仍在 TA1 基体侧,即在不同退火工艺条件下,TA1 基体的剪切强度仍决定了 TA1/TC4 复合板的界面剪切强度。

如图 6 所示,TC4 侧剪切断面主要为平切断口,仅在局部出现剪切韧窝,TA1 侧断面则整体均为平切断口,滑移流变形式明显。当退火温度为 400 ℃ 时,根据断面扫描结果得知,剪切断裂位置仍在 TA1 基体处,观察分析两侧断口,发现两侧微孔聚集性韧窝数量明显增加,滑移平坦区域范围变化较小,

表 1 TA1/TC4 复合板剪切断口元素原子百分比
Tab. 1 Atom fraction of shear fracture element of TA1/TC4 composite plate

Temperatures/ ℃	TC4 side element/%			TA1 side element/%		
	Ti	Al	V	Ti	Al	V
25	99.9	0.1	0	99.8	0.1	0.1
350	99.9	0.1	0	99.8	0.2	0
400	99.9	0.1	0	99.9	0.1	0
450	99.8	0.2	0	99.8	0.3	0.1
500	99.9	0.1	0	99.9	0.1	0
550	99.9	0.1	0	99.9	0.1	0
600	99.9	0.1	0	100	0	0

说明复合板塑性提升,但界面结合强度降低,剪切断裂模式开始由脆性断裂向韧性断裂转变。如图 6c 和 6g 所示,当退火温度为 500 ℃ 时,复合板断口两侧分布有大量的剪切韧窝,但还存在着滑移平坦区域,断裂模式更接近韧性断裂;当退火温度进一步提高至 600 ℃ 时,两侧断口剪切韧窝变大,整体呈波浪状,且界面有明显的撕裂特征,根据断口元素线扫描结果可知,断口断裂位置仍处于 TA1 基体侧,这说明 TA1/TC4 复合板界面剪切强度仍表现为 TA1 基体的剪切性能。结果表明,随着退火温度的升高,TA1/TC4 复合板剪切断口逐渐转变为塑性断裂,断口塑性提升明显,且无论在轧制态还是退火态条件下,断裂位置均在 TA1 基体上,断口的 TC4

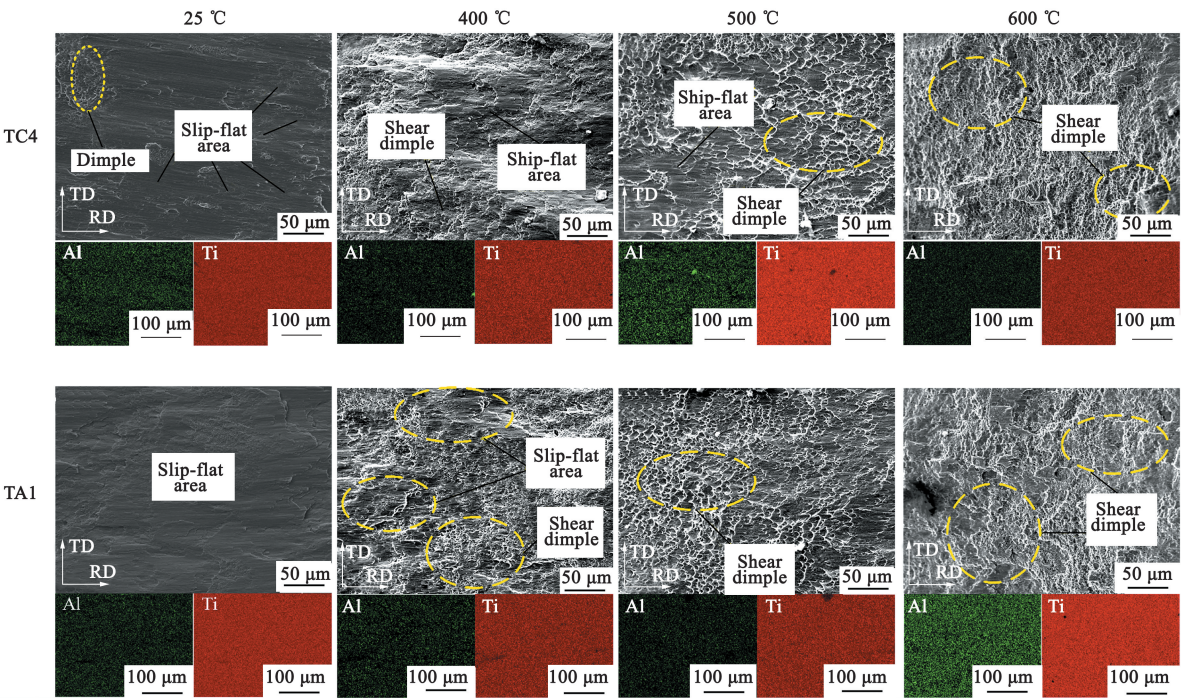


图 6 “波+平”轧 TA1/TC4 复合板在不同退火温度下的剪切断口形貌和 EDS 映射图像

Fig. 6 Shear fracture morphologies and EDS mapping images of “corrugated+flat” rolled TA1/TC4 composite plates at different annealing temperatures

侧被TA1基体完全覆盖,但TC4侧少量元素扩散至TA1基体内,故两侧断口元素面扫描结果显示Al和V元素含量极低。这说明TA1/TC4复合板界面剪切强度远高于TA1基体的剪切强度,与拉伸测试结果一致,TA1基体的性能决定了复合板的抗剪性能。

综合上述结论,当热处理温度为500℃时,复合板的伸长率较轧制态有明显提升,且保持了较高的屈服强度802.3 MPa和剪切强度366.54 MPa,该状态拉伸断口没有出现明显的分层断裂现象,剪切破坏位置位于TA1基体侧,均表明该热处理温度在保证复合板强度的同时,显著提升了复合板的韧性。因此,TA1/TC4复合板在500℃,1 h的退火条件下可以获得良好的综合性能。

4 结论

(1) 在较低退火温度(350~450℃)条件下,复合板基材的静态回复程度较低,复合板内部的加工硬化现象仍较明显,导致复合板韧性能力提升不明显,当退火温度提升至500~600℃,复合板伸长率从原始板坯的7.2%提升至13.9%,塑性明显改善。但退火温度高于500℃时会导致复合板的屈服强度和剪切强度迅速下降,600℃条件下仅分别为703.1和301.27 MPa,分别是原始板坯的81.3%和65.83%。

(2) TA1/TC4复合板界面处元素扩散能力随着温度升高逐渐增强,波谷位置尤为明显,扩散层宽度从原始板坯的2.6 μm提升至4.0 μm,扩散层厚度将影响复合板的界面剪切强度。复合板拉伸断口TC4在不同退火温度下均呈现韧性断裂特征,TA1侧在500℃及以上温度处理时才逐渐呈现韧性断裂特征,剪切断口两侧材料的剪切韧窝也随着退火温度的升高而逐渐增多,剪切断口均出现在TA1基体侧,因此,TA1侧的力学性能决定了复合板的综合性能。

(3) “波+平”二道次轧制后制备得到的TA1/TC4复合板较合适的退火工艺制度为退火温度500℃,退火时间为1 h。该条件下复合板的屈服强度为802.3 MPa,剪切强度为366.54 MPa,伸长率接近10.5%,在保证复合板强度的同时使其塑性变形能力显著提升。

参考文献:

[1] DHIB Z, GUERMAZI N, KTARI A, et al. Mechanical bonding

properties and interfacial morphologies of austenitic stainless steel clad plates [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 696: 374–386.

[2] LEE J E, BAE D H, CHUNG W S, et al. Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 187–188: 546–549.

[3] HOSSEINI S A, HOSSEINI M, DANESH MANESH H. Bond strength evaluation of roll bonded bi-layer copper alloy strips in different rolling conditions [J]. *Materials & Design*, 2011, 32 (1): 76–81.

[4] LI Z, SUN Y, LAVERNIA E J, et al. Mechanical behavior of ultrafine-grained Ti-6Al-4V alloy produced by severe warm rolling: The influence of starting microstructure and reduction ratio [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, 46 (11): 5047–5057.

[5] LEK J Y, BHOWMIK A, TAN A W-Y, et al. Understanding the microstructural evolution of cold sprayed Ti-6Al-4V coatings on Ti-6Al-4V substrates [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 459: 492–504.

[6] 吕震宇. 异步轧制铜/铝复合板界面结合强度研究 [J]. *塑性工程学报*, 2019, 26 (4): 93–97.

LÜ Zhenyu. Research on interfacial bonding strength of asynchronous rolled copper/aluminum composite plate [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2019, 26 (4): 93–97.

[7] 申依伦, 冯光, 郝豪杰, 等. 镁/铝复合薄带轧制成形工艺研究 [J]. *塑性工程学报*, 2023, 30 (8): 92–99.

SHEN Yilun, FENG Guang, GAO Haojie, et al. Research on rolling process of Mg/Al laminated composite strips [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2023, 30 (8): 92–99.

[8] 宜亚丽, 韩晓铠, 张磊, 等. 316L/EH40 不锈钢复合板热轧过程中晶粒组织的均匀性 [J]. *钢铁*, 2020, 55 (1): 47–55.

YI Yali, HAN Xiaokai, ZHANG Lei, et al. Homogeneity of grain structure for 316L/EH40 stainless steel clad plate during hot rolling process [J]. *Iron & Steel*, 2020, 55 (1): 47–55.

[9] WANG T, WANG Y, BIAN L, et al. Microstructural evolution and mechanical behavior of Mg/Al laminated composite sheet by novel corrugated rolling and flat rolling [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 765. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138318.

[10] 王壮. TC4/7075Al 复合板异温轧制成形及轧后退火研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2021.

WANG Zhuang. Research on different temperature rolling forming and annealing of TC4/7075Al composite plate [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.

[11] 郭雷明, 王文焱, 黄亚博, 等. 退火工艺对铸轧钛铝复合板界面组织与性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2018, 43 (4): 194–198.

GUO Leiming, WANG Wenyan, HUANG Yabo, et al. Effect of annealing process on microstructure and properties of interface of cast and rolled Ti/Al composite plate [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2018, 43 (4): 194–198.

[12] LÜ S S, ZHENG L, CHANG D X, et al. Improving the stamping

- formability of rolled titanium/iron composite sheets by annealing [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 845. DOI: 10.1016/j.msea.2022.143241.
- [13] ZHAO Z, TARIQ N U H, TANG J, et al. Microstructural evolutions and mechanical characteristics of Ti/steel clad plates fabricated through cold spray additive manufacturing followed by hot-rolling and annealing [J]. *Materials & Design*, 2020, 185. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108249.
- [14] 李亚杰, 马承睿, 刘翠荣, 等. 波-平轧制钛/铝复合板界面组织特性及性能研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52 (9): 3264–3272.
- LI Yajie, MA Chengrui, LIU Cuirong, et al. Interfacial microstructure and properties of Ti/Al composite plate by wave-flat rolling [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52 (9): 3264–3272.
- [15] 陈文欢. Al/Ti/Al 层状复合材料的拉伸变形行为研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- CHEN Wenhuan. Study on tensile deformation behavior of Al/Ti/Al laminated composites [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [16] QIU X, TARIQ N U H, QI L, et al. In-situ Si-P/A380 alloy nano micro composite formation through cold spray additive manufacturing and subsequent hot rolling treatment: Microstructure and mechanical properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds: An Interdisciplinary Journal of Materials Science and Solid-state Chemistry and Physics*, 2019, 780: 597–606.
- [17] 马誉, 王栓强, 雷航宇, 等. 退火工艺对镁/铝复合板材力学性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2024, (16): 53–55, 61.
- MA Yu, WANG Shuanqiang, LEI Hangyu, et al. Influence of annealing technology on mechanical properties of magnesium/aluminum composite plate [J]. *Hot Working Technology*, 2024, (16): 53–55, 61.