

# Exp-ECAP 工艺对钛铝双金属复合棒材界面组织及性能的影响

王晓溪<sup>1</sup>, 张翔<sup>2</sup>, 张飞<sup>1,3</sup>, 夏晓雷<sup>1</sup>

(1. 徐州工程学院 机电工程学院, 江苏 徐州 221018)

(2. 江苏徐工工程机械研究院有限公司, 江苏 徐州 221004)

(3. 盐城工学院 材料科学与工程学院, 江苏 盐城 224051)

**摘要:** 提出一种耦合镦、剪、挤等多种变形于一体的膨胀-等通道转角挤压工艺 (expansion-equal channel angular pressing, Exp-ECAP)。450 °C 下采用单道次 Exp-ECAP 挤压结合退火热处理成功制备钛铝双金属复合棒材。利用 SEM、EDS、XRD、EBSD 和剪切试验研究了钛铝双金属复合棒材界面微观组织和结合性能。结果表明, 在 Exp-ECAP 变形剧烈剪切应力和退火高温条件下, 钛铝双金属复合棒材获得了良好的界面结合, 钛、铝 2 种基体元素通过相互扩散形成了厚度约为 1.27  $\mu\text{m}$  的冶金结合层, 界面层内生成的新相以金属间化合物 TiAl 为主, 并含有少量不均匀分布的 Ti<sub>3</sub>Al (靠近钛侧) 和 TiAl<sub>3</sub> (靠近铝侧)。Ti/Al 界面层金属通过发生相变反应和部分再结晶产生了大量等轴、细小的超细晶组织, 晶粒随机生长, 无明显的择优取向。钛铝双金属复合棒材平均剪切强度为 66.29 MPa, 剪切破坏主要发生在 TiAl 相层, 表现出脆性断裂的特征。

**关键词:** 膨胀-等通道转角挤压; 钛铝双金属; 界面组织; 结合性能

中图分类号: TG376

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)11-3121-08

随着我国航空航天、海洋工程、轨道交通等新兴产业的飞速发展, 单一化金属及合金已很难满足现代工业对关键结构材料提出的苛刻性能要求。双金属材料可通过“互补效应”获得单一金属所不具备的优异综合性能, 成为当今材料科学领域的一大研究热点<sup>[1-2]</sup>。钛合金具有比强度高、耐腐蚀、耐高温、生物相容性好等优点<sup>[3-5]</sup>, 近年来在航空航天、石油化工、生物医学等领域应用广泛, 但其高昂的成本使其大规模应用受到了一定限制。相反, 铝合金具有密度小、塑性好、导热导电性好等优点, 且材料来源广泛, 在生产成本竞争力上具有显著的优势<sup>[6]</sup>。因此, 以铝合金为基体, 在其外表面包覆一层钛材, 形成钛铝双金属复合材料, 使 2 种材料在性能上取长补短, 产生协同效应, 可在改善钛合金加工性能的同时进一步提高传统铝合金强度, 以满足高端装备产品轻量化制造对高性能材料的迫切需求, 具有广阔的发展空间和应用前景。

目前, 钛铝复合材料在工业上的应用多以复合板材为主<sup>[7-8]</sup>, 其制备方法主要为热轧复合法<sup>[9-10]</sup>和爆炸复合

法<sup>[11-12]</sup>。虽然上述 2 种方法优点突出, 但也存在一定的局限性。如热轧复合法通常需在较高的温度下进行, 易造成钛铝结合界面层组织粗大、脆性金属间化合物生成过多且分布不均匀, 严重影响复合材料的结合质量; 而爆炸复合法工艺复杂, 工业化生产难度较大, 且存在污染环境、操作危险等问题。因此, 寻求一种理想的双金属复合材料制备新工艺, 以获得兼具良好塑韧性与高强度界面结合的钛铝复合棒材, 对于充分发掘复合材料性能潜力, 拓宽其在工业领域中的应用具有重要意义。

为此, 本研究针对钛、铝 2 种材料性能差异大, 钛铝复合材料结合质量不佳等问题, 在传统等通道转角挤压工艺<sup>[13]</sup>基础上, 提出一种新型膨胀-等通道转角挤压法 (expansion-equal channel angular pressing, Exp-ECAP), 用于制备高性能钛铝双金属复合棒材。通过对 Ti/Al 结合界面层进行组织观察、相成分分析和力学性能测试, 探讨分析耦合剧烈塑性变形下钛铝双金属复合棒材界面组织演变机理和结合性能, 以期为优质钛铝复合材料的制备加工和改性研究提供一种新思路。

收稿日期: 2024-04-12

基金项目: 国家自然科学基金 (51905462); 江苏省自然科学基金 (BK20201150, BK20221212); 江苏省高校自然科学研究重大项目 (21KJA460007); 江苏省“333 高层次人才培养资助项目”

作者简介: 王晓溪, 女, 1985 年生, 博士, 教授, 徐州工程学院机电工程学院, 江苏 徐州 221018, 电话: 0516-83105975, E-mail: xiaoxi119@vip.163.com

# 1 实验

试验所用材料为退火态 TA2 纯钛板和 1050 纯铝棒, 2 种材料的化学成分见表 1 和表 2。采用机加工分别制成钛包套和铝芯棒, 复合坯料尺寸及实物如图 1 所示。试验前, 对钛、铝坯料表面进行打磨和抛光处理, 随后在乙醇和丙酮溶液中超声清洗 10 min 以去除油污。待空气中自然晾干后, 迅速过盈装配成钛铝双金属复合坯料。

在 YDL-2000 型万能试验机上, 采用自行设计的模具及工装开展钛铝双金属复合棒材单道次 Exp-ECAP 挤压实验, 如图 2 所示。由图 2 可知, 新型 Exp-ECAP 工

艺对传统 ECAP 模具结构进行了优化和改进, 通过对模具转角进行扩径设计, 使得坯料经过转角区时同时发生镦粗、剪切与挤压等多种形式的耦合变形, 有效增大了单道次变形过程中材料内部的累积应变量, 实现了“一次挤压、多种工艺、耦合变形”的目标。本实验条件下, Exp-ECAP 模具为水平分模结构, 模具内角为 90°, 通道截面为方形, 基本尺寸为 10 mm×10 mm, 转角膨胀变形区截面尺寸为 12 mm×10 mm。为减小摩擦对剧烈塑性变形带来的不利影响, 实验前在复合坯料表面和模具通道内均匀涂覆高温润滑剂。复合坯料和挤压模具预热温度均为 450 °C, 保温时间为 30 min, 挤压速度为 1 mm/s。

挤压结束后, 将所制备的钛铝双金属复合坯料在 600 °C 下进行 2 h 退火处理, 以消除 Exp-ECAP 变形过程中产生的内应力<sup>[14]</sup>, 保证双金属材料获得良好的界面结合质量。利用线切割沿钛铝双金属复合坯料轴线方向切取若干个厚度为 2~3 mm 的试样, 用于组织观察和性能测试, 测试面均为试样横截面。在 TESCAN MIRA LMS 场发射扫描电镜上 (配有 Octane Elect EDS 系统) 对钛铝双金属复合棒材结合界面 (BSE 模式) 及剪切试样断口进行形貌观察和成分分析。利用 D8 ADVANCE X 射线衍射仪对钛铝双金属复合棒材结合界面层进行物相分析。采用 JSM-7900F 热场发射扫描电镜 (配有 Hikari XP

表 1 TA2 纯钛化学成分

**Table 1 Chemical composition of TA2 pure titanium (ω/%)**

Fe	N	C	O	H	Ti
0.072	0.017	0.012	0.14	0.001	Balance

表 2 1050 纯铝化学成分

**Table 2 Chemical composition of 1050 pure aluminum (ω/%)**

Fe	Cu	Mg	Zn	Mn	Si	Al
≤0.4	≤0.05	≤0.05	≤0.07	≤0.05	≤0.25	Balance

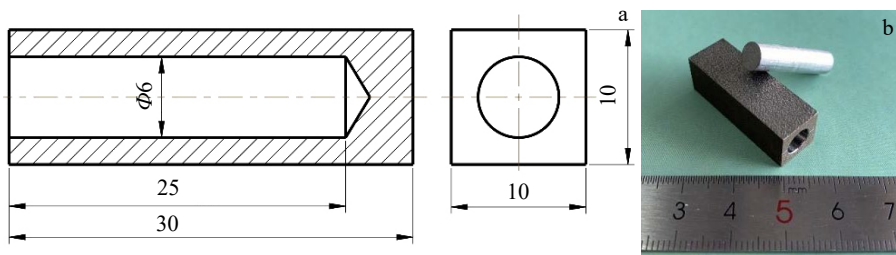


图 1 实验用钛包套和铝芯棒尺寸及实物图

Fig.1 Dimension (a) and photo (b) of titanium tube and aluminum core rod used in the experiment

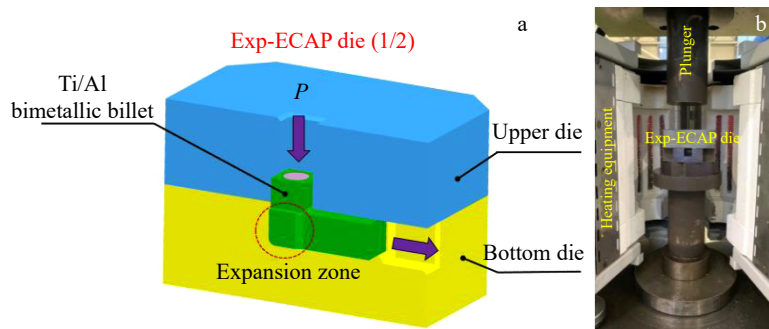


图 2 Exp-ECAP 工艺原理及模具工装实物图

Fig.2 Schematic diagram of Exp-ECAP process (a) and the photo of die and tooling (b)

EBSD 系统)对 Ti/Al 结合界面层组织进行表征,样品倾斜角为 70°,扫描步长为 0.4 μm,加速电压为 20 kV。室温下,在 ETM-104C 电子万能试验机上对钛铝双金属试样进行剪切试验,共测试 3 组试样,分别计算其界面结合强度,取其平均值作为最终结果。剪切试样厚度为 2.5 mm,剪切速度为 1 mm/min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 界面形貌及元素分布

图 3 为背散射模式下钛铝双金属复合棒材结合界面的 SEM 形貌以及 EDS 面扫描分布图。

由图 3a 可以看出,经 Exp-ECAP 热挤压及退火处理后,钛铝双金属基体之间结合紧密,界面平直清晰,未出现孔洞、间隙、裂纹等缺陷。进一步观察图 3b 可以发现,在 Ti/Al 结合界面附近形成了一个明显区别于两侧基体组织的深灰色过渡层,界面呈现锯齿状“起伏”,结合层平均厚度约为 1.27 μm。结合图 3c 和图 3d 所示的 EDS 面扫描结果可知, Ti/Al 结合界面附近存在明显的元素互扩散现象,钛、铝 2 种原子通过发生扩散反应形成了连续、致密的冶金结合层。由此可以推断,本实验条件下钛铝双金属之间实现了有效的冶金结合, Ti/Al 扩散层内可能会有新相产生。

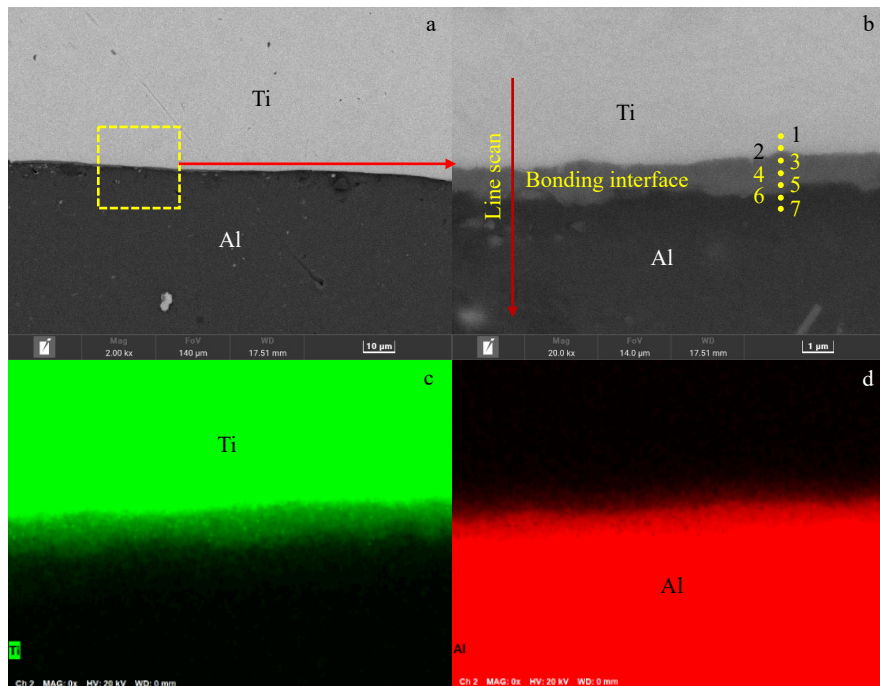


图 3 钛铝双金属复合棒材结合界面形貌及 EDS 面扫描

Fig.3 SEM images (a-b) and EDS mappings (c-d) at the bonding interface of Ti/Al bimetallic composite rod: (c) Ti element distribution and (d) Al element distribution

### 2.2 界面相成分分析

为研究结合界面层内元素扩散分布规律,对钛铝双金属复合棒材结合界面附近区域进行 EDS 线扫描(扫描区域及方向见图 3b),结果如图 4 所示。分析图 4 可知,钛、铝 2 种元素整体扩散规律基本一致。即在靠近基体一侧,元素含量保持相对稳定,而在结合界面附近产生明显的浓度梯度,元素含量呈现平缓下降趋势,最终在 Ti/Al 结合界面附近出现一个相对稳定的微小平台,扩散层宽度与上述 SEM 观察到的结果相吻合。

为确定钛铝结合界面层内各相的化学成分,采用 EDS 点扫描(点扫区域见图 3b)和 XRD 相结合的方式进行分析。

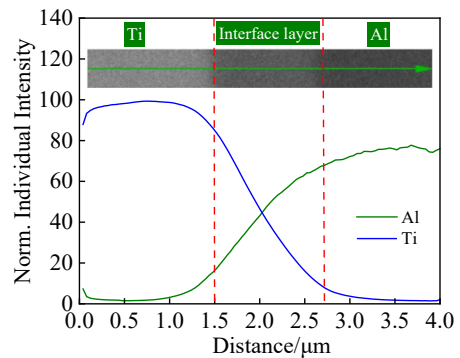


图 4 图 3b 中钛铝双金属复合棒材结合界面 EDS 线扫描结果  
Fig.4 EDS line scanning results at the bonding interface of Ti/Al bimetallic composite rod in Fig.3b

经分析计算各点原子比（表 3）可知，除 Ti、Al 2 种基体组织外，钛铝双金属复合棒材界面层内还存在着不同种类的金属间化合物。结合 Ti-Al 二元合金相图<sup>[15]</sup>可以推断，Ti/Al 结合界面层生成的新相主要为 TiAl，并含有少量的 Ti<sub>3</sub>Al（靠近钛侧）和 TiAl<sub>3</sub>（靠近铝侧）。这一点从图 5 所示的 XRD 结果中也得到了证实。需要说明的是，本实验条件下由于钛、铝原子在扩散过程中形成了微合金化层<sup>[16]</sup>，所生成的 Ti/Al 界面扩散层厚度较小。因此，XRD 下所观察到的部分相衍射峰较小，且所处位置与标准峰略有偏差。

表 3 图 3b 中钛铝双金属复合棒材结合界面各相的主要元素含量

**Table 3 Main element content of each phase at the bonding interface of Ti/Al bimetallic composite rod in Fig.3b**

Position	1	2	3	4	5	6	7
Ti content/at%	98.31	80.52	65.58	48.10	33.01	20.05	2.37
Al content/at%	1.69	19.48	34.52	51.90	66.99	79.95	97.63
Atomic ratio	-	4.13	1.90	0.93	0.49	0.25	-
Possible phase	Ti	Ti+Ti <sub>3</sub> Al	Ti+TiAl	TiAl	TiAl+Al	TiAl <sub>3</sub> +Al	Al

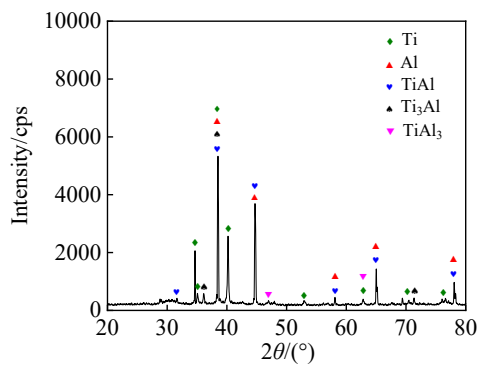


图 5 钛铝双金属复合棒材 XRD 图谱

Fig.5 XRD pattern of Ti/Al bimetallic composite rod

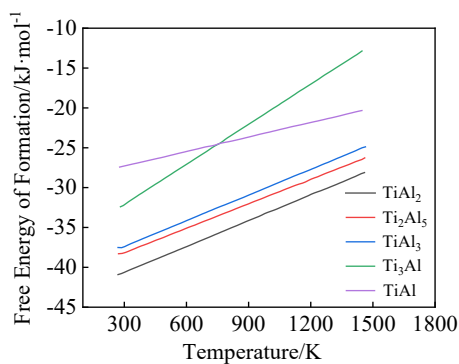


图 6 Ti-Al 系金属间化合物生成自由能与温度关系曲线

Fig.6 Relationship between free energy of formation and temperature of Ti-Al intermetallic compounds

研究表明<sup>[16]</sup>，界面金属间化合物的形成实际上是钛、铝原子相互扩散的过程，受温度、时间、扩散系数等因素的综合影响。常见的 Ti-Al 系金属间化合物主要包括 Ti<sub>3</sub>Al、TiAl、Ti<sub>3</sub>Al、TiAl<sub>2</sub> 和 Ti<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> 等 5 种，其生成顺序由热力学因素和动力学因素共同决定。Katter 等<sup>[17]</sup>通过对 Ti-Al 系材料的反应生成热力学进行计算和评估，获得了钛铝金属间化合物吉布斯自由能与温度的关系曲线，如图 6 所示。从图 6 可以看出，TiAl<sub>3</sub> 相对于 Ti<sub>3</sub>Al 和 TiAl 具有更低的自由能。虽然 TiAl<sub>2</sub> 和 Ti<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> 2 种化合物的生成自由能更低，但从扩散动力学角度来

看，它们的形成需要通过一系列固-液或固态反应，且二者的存在必须以 TiAl 生成为前提<sup>[18]</sup>。

本实验条件下，Ti/Al 界面层内原子的扩散反应过程可结合图 7 进行解释说明。反应初期，由于铝原子在钛中的固溶度远大于钛原子在铝中的固溶度，且化合物中 TiAl<sub>3</sub> 的自由能最低，因此，界面层主要由铝原子向钛侧扩散生成。当铝原子在钛基体中的溶解度达到过饱和和浓度时，Ti/Al 反应界面中首先析核析出 TiAl<sub>3</sub>，并在界面靠近铝的一侧富集。在 Exp-ECAP 变形强大塑性剪切和热处理高温双重作用下，钛、铝 2 种元素活性增加，原子扩散系数增大，优先生成的界面相 TiAl<sub>3</sub> 会继续沿着

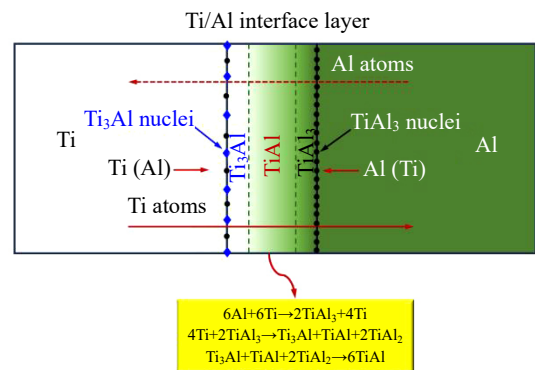


图 7 理想条件下 Ti/Al 结合界面原子扩散反应示意图

Fig.7 Schematic diagram of atomic diffusion reaction inside Ti/Al bonding interface layer under ideal conditions



深度和宽度方向扩展, 界面层厚度逐渐增大。随着界面反应进一步进行, Ti/TiAl<sub>3</sub> 界面处 TiAl<sub>3</sub> 层中的 Al 原子向钛层一侧继续扩散, 相继在界面处生成 Ti<sub>3</sub>Al、TiAl<sub>2</sub> 和 TiAl 等金属间化合物, 温度较高时还会出现中间产物 Ti<sub>2</sub>Al<sub>5</sub><sup>[19]</sup>。在钛、铝原子充分发生扩散反应的理想情况下, 最终稳定生成物为 TiAl。由于本实验条件下退火温度和时间不充分, 因此所观察到的 Ti/Al 结合界面层中金属间化合物种类并不单一, 从钛侧向反应层侧依次为 Ti<sub>3</sub>Al、TiAl 和 TiAl<sub>3</sub>。

### 2.3 界面 EBSD 组织

为研究 Exp-ECAP 制备钛铝双金属复合棒材界面组织的演变规律, 对 Ti/Al 界面结合区的微观组织进行 EBSD 分析, 结果见图 8。由图 8a 所示的 EBSD 相分布图可知, Exp-ECAP 工艺剧烈剪切和后续热处理为钛、铝原子相互扩散提供了强大的驱动力, 钛铝双金属棒材获得了良好的冶金结合, 扩散层致密连续, 结合界面出现了 TiAl、Ti<sub>3</sub>Al 和 TiAl<sub>3</sub> 等少量的金属间化合物。这一结果与前述物相分析结论基本一致。然而, 由于本实验退火温度不高 (600 °C) 且时间较短 (2 h), 热处理过程中没有足够的热力学和动力学条件促使钛、铝原子充分发生扩散反应, 界面处原子的不均匀分布导致了相的不规则生长。因此, 最终所制备的钛铝双金属复合棒材扩散层厚度较小且呈现出不规则形貌, 结合界面生成的新相以稳定生成物 TiAl 为主, 并含有少量不均匀分布的 Ti<sub>3</sub>Al 和 TiAl<sub>3</sub>。

图 8b 为钛铝双金属复合棒材结合界面的 EBSD 衍射质量图。可以看出, Exp-ECAP 剧烈剪切变形过程中, 由于钛、铝 2 种金属性能差异较大, 基体变形出现了不协调, 双金属的变形主要由塑性较好的铝侧承担。因此, 靠近铝

基体一侧的晶粒细化效果明显较钛一侧更好。同时, 界面层附近材料表现出更明显的局部应变<sup>[20]</sup>, 结合界面内金属产生了较大的塑性变形, 并通过发生相变反应和部分再结晶, 生成了大量等轴、细小的超细晶组织, 新晶粒随机生长且分布不均匀, 无明显的择优取向, 如图 8c 所示。

如前所述, Exp-ECAP 工艺集墩粗、剪切、挤压等多种变形形式于一体, 多效应耦合作用下钛铝双金属复合棒材实际发生了近似简单剪切变形<sup>[21]</sup>, 材料内部累积了较高的塑性应变。一方面, 两种基体金属剧烈的变形耦合使得双金属之间相互“镶嵌”, 结合界面产生锯齿状“起伏”, 增大了界面间的摩擦力, 加速了结合层内钛、铝表面原始氧化膜的破碎, 有利于基体新鲜金属充分暴露并相互接触, 发生机械啮合行为。另一方面, 在 Exp-ECAP 工艺强大的塑性剪切作用下, 钛铝复合材料晶粒得到了充分破碎和细化, 内部晶体缺陷增加, 结合界面处存在较大的内应力<sup>[22]</sup>, 从而为新相的非均质形核提供了有利的条件。随后的退火热处理进一步提高了钛、铝原子的扩散激活能, 增大了原子扩散系数。Ti/Al 界面层金属通过发生相变生成不同种类的金属间化合物, 并产生部分再结晶形成超细晶组织, 最终使得钛、铝基体之间的结合状态由从最初的机械结合转变成为了牢固的冶金结合。

### 2.4 界面结合强度

结合强度是评价双金属复合材料制备成功与否的关键指标。为验证新型 Exp-ECAP 工艺的可靠性和有效性, 对所制备的钛铝双金属复合棒材进行剪切试验, 结果如图 9 所示。

从图 9a 可以看出, 钛铝双金属复合试样发生剪切变形的时间很短, 试样几乎未产生塑性变形便沿钛铝结合

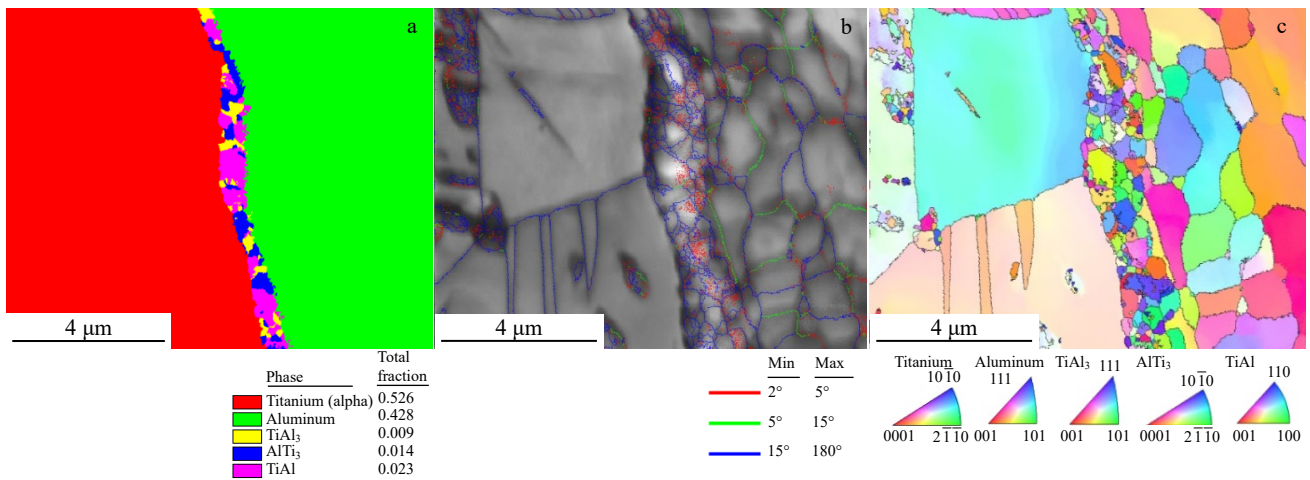


图 8 钛铝双金属复合棒材结合界面区 EBSD 结果

Fig.8 EBSD results at the bonding zone of Ti/Al bimetallic composite rod: (a) phase map, (b) diffraction pattern quality map, and (c) orientation imaging map

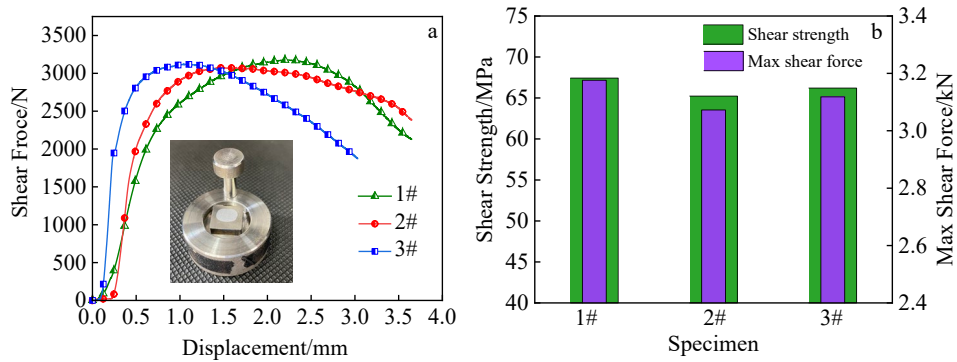


图 9 钛铝双金属复合试样剪切试验结果

Fig.9 Shear test results of Ti/Al bimetallic composite specimen: (a) shear force-displacement curves and (b) shear strength

界面发生分离，3 组剪切试验具有较好的重复性，最大剪切力平均值约为 3.12 kN。根据式 (1) 计算各组试样剪切强度，得出 Ti/Al 结合界面平均剪切强度为 66.29 MPa (见图 9b)，超过了母材纯铝的抗剪强度 (≈60 MPa)，高于采用异温轧制法<sup>[23]</sup>和非等通道横向挤压工艺<sup>[24]</sup>制备的钛铝复合板的剪切强度。这表明 Exp-ECAP 工艺下钛铝双金属复合棒材界面结合质量良好，基体之间形成了有效的冶金结合。

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi dh} \quad (1)$$

式中， $\tau$  为剪切强度 (MPa)， $F$  为最大剪切力， $d$  为剪切面直径 (mm)， $h$  为剪切试样高度 (mm)。

对钛铝双金属试样两侧的剪切断口进行 SEM 观察和成分分析，结果分别如图 10 和表 4 所示。

观察图 10a 可以发现，靠近钛侧的剪切断口凹凸不平，呈高低起伏的“沟壑”状，EDS 结果显示断裂面上存在大量的铝元素，相应点的钛、铝原子比接近 1:1，表明钛侧断口内存在金属间化合物 TiAl。相反，靠近铝侧断口较为平整，出现了大量平行的撕裂棱 (图 10b)，且

撕裂深度较钛侧更深，具有明显的塑性剪切变形特征。结合对应点元素含量的 EDS 分析结果可知，铝侧断口上主要成分为铝元素，而钛元素的含量较少，仅在局部微区检测出了少量的金属间化合物。由此推断，剪切试样从脆硬的结合界面层处撕开，剪切破坏主要发生在 TiAl 相层。这是由于钛铝金属间化合物为脆硬相，在剪切应力作用下极易产生裂纹，加速了组元金属的剪切断裂进程，使其表现出典型的脆性断裂特征<sup>[25]</sup>。

研究表明，为保证双金属复合材料获得良好的界面结合效果，基体原子之间必须通过相互扩散，发生冶金反应形成致密、连续且均匀的界面结合层。因此，界面形状、界面层的厚度、界面组织中反应生成相的种类及其分布等因素都将对复合材料结合质量产生重要影响。Exp-ECAP 热挤压过程中，钛铝双金属复合材料内部承受了较大的塑性变形，Ti/Al 结合界面附近原子被激活，有利于双金属复合棒材形成牢固的金属键，获得良好的冶金结合。然而，由于 Exp-ECAP 变形时间较短，钛、铝 2 种基体金属因塑性差异较大产生不同步变形，导致 Ti/Al 结合界面附近存在较大的内应力，因此需要通过热

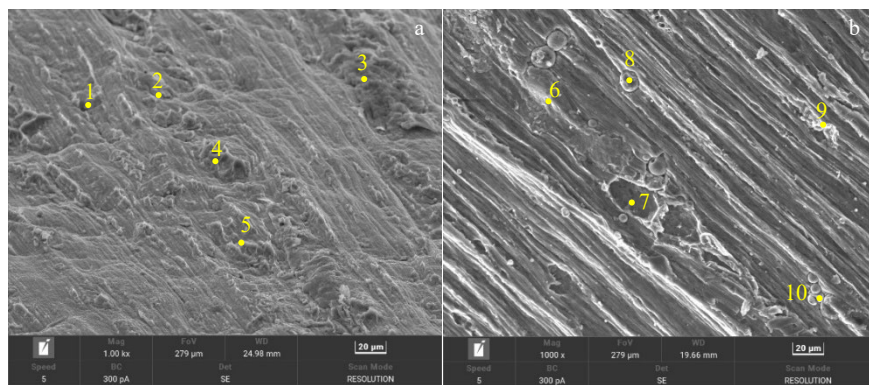


图 10 钛铝双金属剪切试样断口 SEM 照片

Fig.10 SEM images of the fracture surface of Ti-Al bimetallic shear specimen: (a) Ti side and (b) Al side

表 4 图 10 中钛铝双金属棒材剪切断面处特征点 EDS 分析

Table 4 EDS analysis of characteristic points at the shear fracture surface of Ti/Al bimetallic rod in Fig.10 (at%)

Element	Position of Ti side					Position of Al side				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ti	44.87	48.20	45.26	46.88	46.77	97.67	98.56	57.77	67.84	56.31
Al	55.13	51.80	54.74	53.12	53.23	2.33	1.44	42.23	32.16	43.69

处理进一步增大界面母材之间的相互扩散。本实验条件下,通过合理调控退火工艺参数,抑制了过多脆性金属间化合物的生成,使得最终制备的钛铝双金属界面层内仅有一薄层金属间化合物生成,对于提高钛铝复合棒材结合质量起到了积极的作用。

### 3 结 论

1) 采用单道次 Exp-ECAP 热挤压结合退火热处理成功制备出界面结合质量良好的钛铝双金属复合棒材。在 Ti/Al 结合界面附近,钛、铝原子通过互扩散形成了厚度约为 1.27  $\mu\text{m}$  的冶金结合层,结合界面内出现  $\text{Ti}_3\text{Al}$ 、TiAl 和  $\text{TiAl}_3$  等不同种类的金属间化合物。

2) 在 Exp-ECAP 耦合剧烈剪切变形和退火高温的双重作用下,基体金属之间元素发生了明显的互扩散,扩散层致密连续,生成的新相以稳定化合物 TiAl 为主,并含有少量不均匀分布的  $\text{Ti}_3\text{Al}$  和  $\text{TiAl}_3$ 。Ti/Al 界面结合层内金属通过发生相变反应和部分再结晶,生成了大量等轴、细小的超细晶组织,新晶粒随机生长,无明显的择优取向。

3) Exp-ECAP 工艺制备的钛铝双金属复合棒材结合性能良好,平均剪切强度为 66.29 MPa。剪切试样从脆硬的结合界面层处撕开,剪切破坏主要发生在 TiAl 相层,表现出脆性断裂特征。

#### 参考文献 References

- [1] Qiao Jisen(乔及森), Xia Zonghui(夏宗辉), Liu Libo(刘立博) et al. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*(中国腐蚀与防护学报)[J], 2021, 41(2): 255
- [2] Liu X B, Chen R S, Han E H. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2009, 209(10): 4675
- [3] Hong Quan(洪权), Guo Ping(郭萍), Zhou Wei(周伟). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2022, 39(5): 27
- [4] Wang Shuaizhuo, Hu Zhaohua, Huang Zhaowen et al. *International Journal of Plasticity*[J], 2024, 174: 103908
- [5] Vitus M T, Chong Li, Wang Saifu et al. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*[J], 2020, 92(4): 521
- [6] Zang Jinxin(臧金鑫), Chen Junzhou(陈军洲), Han Kai(韩凯) et al. *Materials China*(中国材料进展)[J], 2022, 41(10): 769
- [7] 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
- [8] Peng Haijian, Hu Jie. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2021, 50(12): 4218
- [9] Pang Lijuan(庞立娟), Li Huirong(李会容), Deng Gang(邓刚) et al. *Iron Steel Vanadium Titanium*(钢铁钒钛)[J], 2022, 43(5): 90
- [10] Ma M, Huo P, Liu W C et al. *Materials Science & Engineering A*[J], 2015, 636: 301
- [11] Tian Xiaodong(田晓东), Wang Xiaomiao(王小苗), Ding Xu(丁旭) et al. *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2020, 37(6): 34
- [12] Guo Xunzhong, Fan Minyu, Liu Zhongli et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2017, 46(5): 1192
- [13] Ren Guangxiao(任广笑), Wang Hongxia(王红霞), Zhou Bin(周斌) et al. *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2016, 37(5): 33
- [14] Xing Binghui, Huang Tao, Xu Liujie et al. *Composite Interfaces*[J], 2022, 29(7): 749
- [15] Cui Shengqiang(崔圣强), Wu Qian(吴倩), Fan Minyu(范敏郁) et al. *Machine Building & Automation*(机械制造与自动化)[J], 2017, 46(5): 20
- [16] Gai Pengtao(盖鹏涛), Wu Wei(吴为), Zeng Songyuan(曾元松) et al. *Materials Science and Technology*(材料科学与工程)[J], 2013, 21(2): 45
- [17] Kattner U R, Lin J C, Chang Y A. *Metallurgical Transaction A*[J], 1992, 23: 2081
- [18] Amir H A, Beitallah E. *Physics of Metals and Metallography*[J], 2019, 120(3): 260
- [19] Wu Binghua(吴兵华). *Research on Reaction Mechanism and Diffusion Reaction Kinetics of Ti/Al*(Ti/Al 扩散反应机理与动力学研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013
- [20] Qiao Jisen(乔及森), Xiang Yangzhi(向阳芷), Nie Shucui(聂书才) et al. *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2017, 45(11): 78
- [21] Edalati K, Bachmaier A, Beloshenko V A et al. *Materials*

- Research Letters*[J], 2022, 10(4): 163
- [22] Dietrich D, Grittner N, Mehner T *et al. Journal of Materials Science*[J], 2014, 49: 2442
- [23] Xiao Hong, Qi Zichen, Yu Chao *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2017, 249: 285
- [24] Tian Mengmeng(田蒙蒙), Sun Kai(孙凯), Liao Juan(廖娟) *et al. Transactions of Materials and Heat Treatment(材料热处理学报)*[J], 2021, 42(9): 22
- [25] Ma Xianglong, Cao Rui, Dong Hao *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2024, 53(4): 1002

## Influence of Exp-ECAP Process on the Interface Microstructure and Properties of Ti/Al Bimetallic Composite Rods

Wang Xiaoxi<sup>1</sup>, Zhang Xiang<sup>2</sup>, Zhang Fei<sup>1,3</sup>, Xia Xiaolei<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China)

(2. Jiangsu XCMG Construction Machinery Research Institute Co., Ltd, Xuzhou 221004, China)

(3. School of Materials Science and Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

**Abstract:** A novel process, expansion-equal channel angular pressing (Exp-ECAP) which couples multiple forms of deformation such as upsetting, shearing, and extrusion into one was proposed. Ti/Al bimetallic composite rod was fabricated by a single pass of Exp-ECAP process at 450 °C combined with post annealing heat treatment. The interface microstructure and bonding properties of Ti/Al bimetallic composite rod were investigated using SEM, EDS, XRD, EBSD and shear test. The results show that under the severe shear stress of Exp-ECAP process and the high-temperature annealing conditions, the Ti/Al bimetallic composite rod achieves good interfacial bonding quality, and a metallurgical bonding layer of approximately 1.27 μm thickness forms through mutual diffusion of the titanium and aluminum matrix elements. New phases generated in the bonding interface layer are mainly intermetallic compound TiAl, and there are a small amount of inhomogeneous distributed Ti<sub>3</sub>Al (near the Ti side) and TiAl<sub>3</sub> (near the Al side). Moreover, a large number of equiaxed ultrafine grains are obtained in the Ti/Al interface bonding layer through phase transformation reactions and partial recrystallization, and the grains grow randomly without obvious preferred orientation. The shear strength of Ti/Al bimetallic composite rod is about 66.29 MPa, and shear failure mainly occurs in the TiAl phase layer, exhibiting brittle fracture characteristics.

**Key words:** expansion-equal channel angular pressing (Exp-ECAP); titanium aluminum bimetallic; interface microstructure; bonding properties

---

Corresponding author: Wang Xiaoxi, Ph. D., Professor, School of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, P. R. China, Tel: 0086-561-83105075, E-mail: xiaoxi119@vip.163.com