

# 电弧熔丝增材制造钛/铝复合材料的组织与性能

夏玉峰, 张雪, 廖海龙, 滕海灏, 郑德宇  
(重庆大学, 重庆, 400000)

**摘要:** 通过基于冷金属转移的电弧熔丝增材制造技术制备了铝/钛复合材料。观察到钛/铝结合界面存在元素扩散, 形成一定厚度的中间反应层, 表明界面结合良好。同时, 通过硬度测试得到界面附近的硬度介于钛侧与铝侧之间, 这主要是由于元素扩散导致界面附近生成了硬脆金属间化合物。考虑到不同的复合比会导致不同力学性能, 通过拉伸试验, 研究了复合比对带缺口的钛/铝复合材料拉伸力学性能的影响规律。结果表明, 在持续拉伸载荷作用下, 钛/铝复合材料的两组成层之间相互影响。随着复合比的增加, 抗拉强度和屈服强度增加, 断后伸长率由于受钛铝之间冶金反应的影响较大, 当钛/铝试样具有较低复合比时, 其断后伸长率甚至小于单一沉积铝, 随后才随着复合比的增加而增大。另外, 运用 ABAQUS 补充了多组复合比下钛/铝复合材料的拉伸过程, 得到了复合比与屈服强度和抗拉强度的关系式。

**创新点:** (1) 由于钛与铝之间的较大的性能差异, 两者间的结合存在较大的问题, 目前许多学者采用了热轧、爆炸焊接等多种方法连接钛与铝, 并对其结合性能和界面显微组织进行了研究。但目前运用电弧增材制造连接钛与铝的方法鲜有研究。因此针对电弧熔丝增材制造的钛/铝复合材料进行了研究, 填补了这一领域的空白。

(2) 目前仅有的几位学者对电弧熔丝增材制造钛/铝复合材料的研究主要侧重于增材过程中铝和钛结合界面的显微结构, 尚未有复合比对钛/铝复合材料整体力学性能影响的研究, 而复合比在产品的实际生产中是一个重要的参数, 了解复合比对复合材料整体力学性能的影响规律能为复合材料后续的研究奠定基础。

(3) 有限元模拟有效的减少研究的时间成本, 对钛/铝复合材料的整体拉伸过程进行了数值模拟, 虽然得到的有限元结果与试验结果有差异, 但整体吻合较好, 这为复合材料后续的研究提供了预测工具。

**关键词:** 电弧熔丝增材制造; 钛铝复合材料; 复合比; 数值模拟

中图分类号: TG 444 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20210422001

## 0 序言

金属复合材料是通过各种连接方法将不同的金属材料复合为一体, 不仅具有单一金属材料所没有的物理、化学性能以及力学特性, 而且可以有效节约稀贵金属材料<sup>[1]</sup>。迄今为止, 钛-钢<sup>[2-3]</sup>、钢-铝<sup>[4-5]</sup>、铜-铝<sup>[6-7]</sup>、不锈钢-碳钢<sup>[8-9]</sup>等金属复合材料已被大量研究并应用到各行各业。由于钛合金具有较高的比强度、高温性能和耐腐蚀性, 因此被广泛应用于医疗、汽车、造船和航空航天等领域<sup>[10]</sup>。然而, 昂贵的价格极大地限制了钛的应用和发展。铝合金有很多良好的性能, 比如重量轻、导电性高、加工性能优异, 并且铝及铝合金相对其它金属价格低廉, 被

广泛应用于各个领域<sup>[11]</sup>。然而, 铝的耐腐蚀性和耐高温冲击性较差, 无法在高温和腐蚀性环境中使用。与纯钛合金和铝合金相比, 钛/铝复合材料不仅具有两种金属构件的优点, 而且具有结构性能、重量和经济效益, 在航空航天、汽车、交通运输等领域具有广阔的应用前景。铝钛复合结构的应用已成为发展趋势<sup>[12]</sup>。

制备钛/铝复合材料的方法包括轧制<sup>[13-14]</sup>、爆炸焊接<sup>[15]</sup>、爆炸与热压复合<sup>[16]</sup>、固液复合铸轧<sup>[17]</sup>以及电弧熔丝增材制造<sup>[18]</sup>。电弧熔丝增材制造 (wire and arc additive manufacturing, WAAM) 是一种以非熔化极电弧、熔化极电弧或等离子电弧作为热源, 通过不断熔化丝材而逐层堆积成形的增材制造技术, 具有成形效率高、材料利用率高、设备成本较低、没有成形腔的限制等特点<sup>[19]</sup>, 越来越受到国内外航空航天制造业的重视, 特别适合制造大型金属零件。相比于爆炸焊接而言, 它更加符合生产环境要求,

更有利于复合材料的大规模生产, 而相比于轧制而言, 它不会受到复合材料组成层变形协调性的限制, 具有更广泛的应用空间。Horgar 等人<sup>[20]</sup>研究发现, WAAM 是适用于 AA5183 铝合金的可行工艺, 并且还证明尽管沉积铝中存在气孔和热裂纹, 但它所获得的强度和硬度值均高于目前已经公开的其它数据; Wang 等人<sup>[21]</sup>研究了 WAAM 沉积后的 Ti-6Al-4V 合金的宏观组织、显微组织和力学性能, 并且表明沉积后的 Ti-6Al-4V 合金平均疲劳寿命明显高于锻造的 Ti-6Al-4V 棒材; Martina 等人<sup>[22]</sup>发现在电弧熔丝增材制造过程中进行层间轧制, 能够克服增材制造的诸多缺点, 有助于该工艺的工业化实施。Tian 等人<sup>[23]</sup>讨论了沉积顺序对冷金属转移技术 WAAM 制备钛/铝复合材料显微组织的影响, 发现首先沉积钛合金比首先沉积铝合金更加适合制备 Ti/Al 异种合金复合材料。但目前, 钛/铝复合材料的相关研究仍处于起步阶段, 且先前的研究都集中于研究制造技术对钛/铝双金属材料的显微组织和力学性能的影响, 对钛/铝双金属复合材料的相关力学性能研究有限, 而相关研究工作对其在结构工程领域的实际应用, 如海洋工程钢结构、化工设备

钢结构及其它高腐蚀环境下的钢结构, 具有重要意义。

本文以 TC4 + ER5356 钛/铝复合材料为研究对象, 通过拉伸、硬度和扫描等试验和检测方法对其力学性能和微观组织进行了分析; 重点研究单调拉伸荷载后的力学性能, 以及复合比对屈服强度、抗拉强度和断后伸长率的影响, 并基于试验和模拟结果, 提出复合比与相应的力学指标的关系等式。研究成果将为钛-铝复合材料在构件层面力学性能的研究提供基础。

## 1 试验方法

以基于冷金属转移技术的 WAAM 系统制备的钛/铝复合材料为研究对象, 焊丝分别为 TC4 钛合金和 ER5356 铝合金, 直径均为 1.2 mm, 焊丝的名义化学成分如表 1 和表 2 所示。TC4 和 ER5356 的送丝速度分别为 9.1 和 5.9 m/min, 焊枪运行速率为 0.3 m/min, 氩气流量为 20 L/min。WAAM 过程包括 3 个阶段, 首先堆焊钛合金, 经过一段时间的冷却后, 在已经堆焊的钛合金表面堆焊铝合金。

表 1 铝合金的化学成分(质量分数, %)  
Table 1 Chemical compositions of the aluminum alloy

材料	Mn	Mg	Cr	Ti	Si	Fe	Cu	Zn	Al
ER5356	0.12	4.85	0.084	0.11	0.034	0.18	0.04	<0.01	余量

表 2 钛合金的化学成分(质量分数, %)  
Table 2 Chemical compositions of the titanium alloy

材料	C	O	N	H	Fe	Al	V	Ti
TC4	0.011	0.1	0.0054	<0.001	0.108	6.05	4.06	余量

对于焊件, 表征材料的力学性能是一项更具挑战性的任务, 因为常规的交叉焊缝拉伸试验的结果很大程度上取决于断裂部位的不确定性。因此文中设计了缺口拉伸试样, 迫使拉伸试件的塑性变形局限于目标材料区域。共设计 6 组不同复合比(复合比指沉积钛的厚度与金属复合材料总厚度的比值)的试件, 分别为 0/5, 3/10, 5/10, 3/5, 4/5, 5/0 (0, 0.3, 0.5, 0.6, 0.8, 1), 每组 2 个, 共计 12 个拉伸试件, 拉伸试件按设计尺寸从母材上取样, 如图 1 所示, 尺寸如图 1b 所示。测量样品端部的横截面尺寸并计算与设计尺寸之间的误差, 记录在表 3 中。其中试件编号的含义, 以 0-5-1 为例, 0 代表缺口处沉积钛的厚度, 5 为缺口处钛/铝复合材料的总厚度,

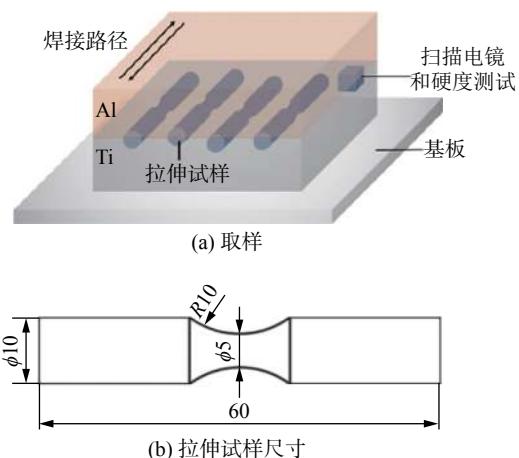


图 1 试样示意图 (mm)

Fig. 1 Diagrammatic sketch of samples. (a) samples; (b) dimension of tensile specimen

1 表示该组的第一个试件。在室温条件下,用万能材料试验机进行拉伸试验,拉伸速率为 1 mm/min。对所截取的金相试样从铝合金向钛合金进行硬度

测量,界面附近 5 个相邻测试点的间距为 0.04 mm,其余位置 0.1 mm。利用扫描电镜 (SEM) 对结合界面进行观察。

表 3 拉伸试样断口的横截面尺寸

Table 3 Measured sectional dimensions of fractured regions of tensile specimens.

试验编号	复合比	TC4厚度 $d_1/\text{mm}$	误差率 $\Delta_1/(\%)$	ER5356厚度 $d_2/\text{mm}$	误差率 $\Delta_2/(\%)$
0-5-1	0.0	—	—	9.8	0.02
0-5-2	0.0	—	—	10.0	0.00
3-10-1	0.3	3.5	0.05	7.0	0.00
3-10-2	0.3	3.0	0.00	6.5	0.05
5-10-1	0.5	4.7	0.03	5.5	0.05
5-10-2	0.5	5.0	0.00	5.0	0.00
3-5-1	0.6	6.0	0.00	4.0	0.00
3-5-2	0.6	5.3	0.06	4.2	0.02
4-5-1	0.8	7.8	0.02	3.0	0.00
4-5-2	0.8	7.5	0.05	2.5	0.05
5-5-1	1.0	9.6	0.04	—	—
5-5-2	1.0	10.0	0.00	—	—

## 2 试验结果

### 2.1 界面层组织特征

由于钛合金和铝合金具有较大的性能差异,在焊接过程中,必定会产生金属间化合物。但一定含量均匀分布的金属间化合物是有利于提高复合材料的结合质量的,韩建超等人<sup>[24]</sup>总结发现,扩散厚度控制在 10 μm 以内可以获得良好的结合质量。**图 2** 显示了 WAAM 制备的钛/铝复合材料的结合界面的 SEM 图像。如**图 2** 所示,界面平整,且具有一定厚度的中间反应层,这表明在制造过程中钛/铝发生冶金反应,能够获得令人满意的结合强度。此外,反应层厚度约为 4 μm,满足了获得良好结合质量的要求。运用 EDS 分析了钛/铝结合界面附近的元素扩散情况,如**图 3** 所示。根据不同的元素含量,Ti/Al 界面可分为 3 个部分:钛层、中间扩散层和铝层。钛层的 Ti, V 元素扩散到铝层,而铝层上的 Al, Mg 元素则不断扩散到钛层,最后扩散元素主要集中在钛与铝之间的中间扩散层,中间扩散层形成多种金属间化合物,这些金属间化合物则主要包含 Ti, Al, Mg 和 V 元素。

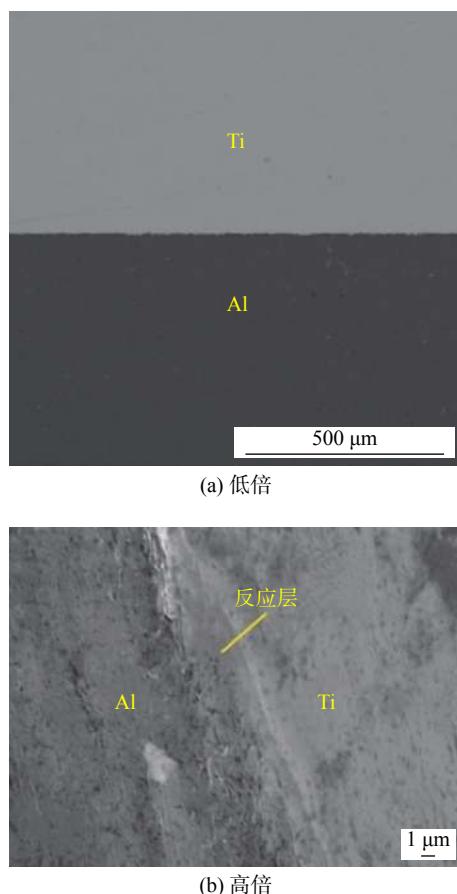


图 2 钛/铝结合界面的 SEM 图像

Fig. 2 SEM image of the bonding interface of Ti/Al.  
(a) low power image; (b) high power image

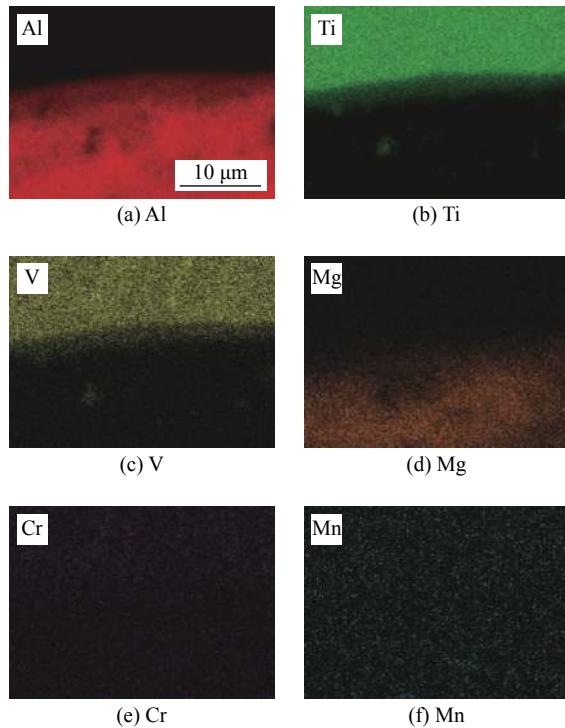


图3 钛/铝结合界面附近元素扩散情况

Fig. 3 EDS element distribution maps of the bonding interface. (a) Al; (b) Ti; (c) V; (d) Mg; (e) Cr; (f) Mn

## 2.2 力学性能

### 2.2.1 硬度分布

图4为钛/铝结合界面附近的硬度分布。由图可知, 铝侧的平均硬度为76.84 HV, 钛侧的平均硬度为325.92 HV。从铝侧到钛侧, 硬度逐渐增加。这主要是由于焊接过程中, 界面附近发生剧烈的元素扩散, 产生了较多钛/铝金属间化合物, 而这些化合物多为硬脆相<sup>[18]</sup>, 因此导致结合界面附近的硬度介于钛侧与铝侧之间。

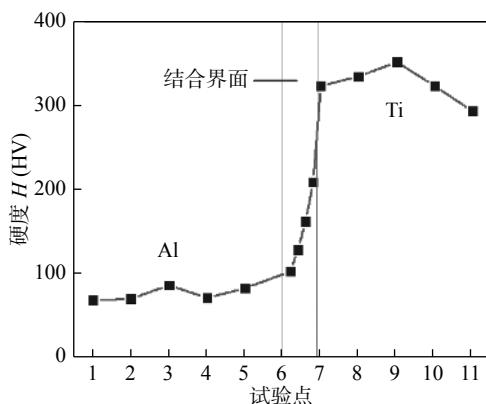


图4 钛/铝结合界面附近的硬度分布

Fig. 4 Hardness distribution near the interface of Ti/Al

### 2.2.2 复合比对拉伸结果的影响

通过拉伸试验, 获得了6组不同复合比下钛/铝

复合材料的应力—应变曲线, 如图5所示。由图可知, 不同复合比所对应的应力—应变曲线的初始斜率接近, 且曲线没有明显的屈服平台, 因此研究采用0.2%的残余应力 $\sigma_{0.2}$ 来定义所有试样的屈服应力。由于缺口的存在, 塑性变形主要集中在缺口处, 因此试样断裂是局部变形的结果。当复合比为0时, 即材料全部为沉积铝, 其应力在达到极限应力250 MPa之后, 试样开始出现不均匀塑性变形, 并且随着应变的增加, 应力下降, 当应力达到沉积铝的断裂强度时, 试样断裂。其局部断后伸长率达到4.05%; 当复合比为1时, 即材料全部为沉积钛时, 与沉积铝的曲线不同的是, 在试样达到极限应力1314 MPa之后, 几乎不发生非均匀变形即断裂, 且局部断后伸长率达到8.5%左右。而对于复合比在0~1之间的试样, 其应力—应变曲线位于复合比为0和复合比为1的曲线之间, 并且几乎都在应力达到极限值时断裂。这说明钛/铝复合材料变形时, 由于铝与钛之间发生了冶金结合, 两组成层在变形过程中相互影响。

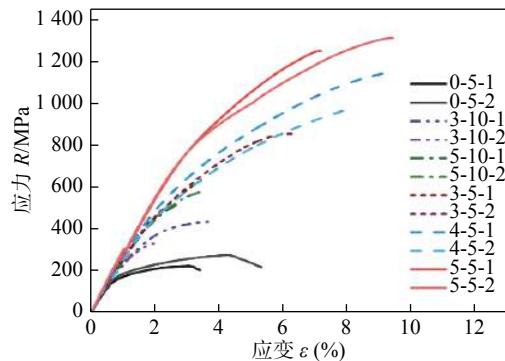


图5 不同复合比下的钛/铝复合材料的应力—应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of Ti/Al composite materials with different clad ratio

不同复合比下试样的屈服强度、抗拉强度和断后伸长率的平均值如图6所示。钛/铝复合材料的抗拉强度和屈服强度均大于单一沉积铝, 小于单一沉积钛, 随着复合比增加, 抗拉强度和屈服强度均增加, 这是因为沉积钛的屈服强度和抗拉强度远高于沉积铝所导致的。但对于局部断后伸长率而言, 由于钛/铝之间的产生了冶金结合, 当复合比较低时, 其局部断后伸长率甚至小于单一沉积铝, 随后随着复合比的增加, 其局部断后伸长率才逐渐增大。进一步证明在拉伸过程中钛和铝两组成层之间会互相影响。由此可得, 随着复合比的变化, 材料的整体力学性能出现了规律变化。

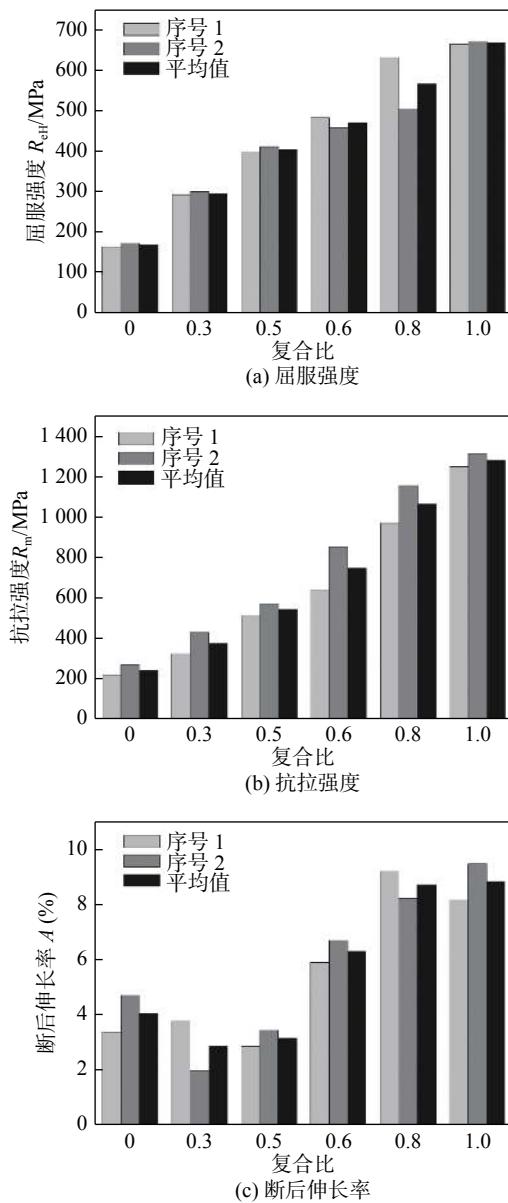


图 6 复合比对力学性能参数的影响

Fig. 6 Effect of clad ratio on performance parameters.  
(a) yield strength; (b) tensile strength; (c) elongation

### 2.3 有限元模拟和本构模型

考虑到试验数据有限, 运用有限元模拟软件 ABAQUS 对钛/铝复合材料的拉伸过程进行了模拟。几何模型由两个半圆柱模型组装而成, 如图 7 所示, 模拟结果和试验结果对比如图 8 所示。在材料属性板块, 将复合比为 0 和复合比为 1 拉伸试验

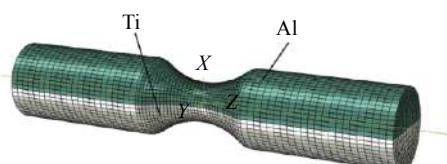


图 7 钛铝复合材料的有限元模型

Fig. 7 The geometric model of the finite element

得到的应力—应变关系分别赋予铝和钛。Liu 和班慧勇等人<sup>[25-26]</sup>运用 ABAQUS 中提供的基于表面的

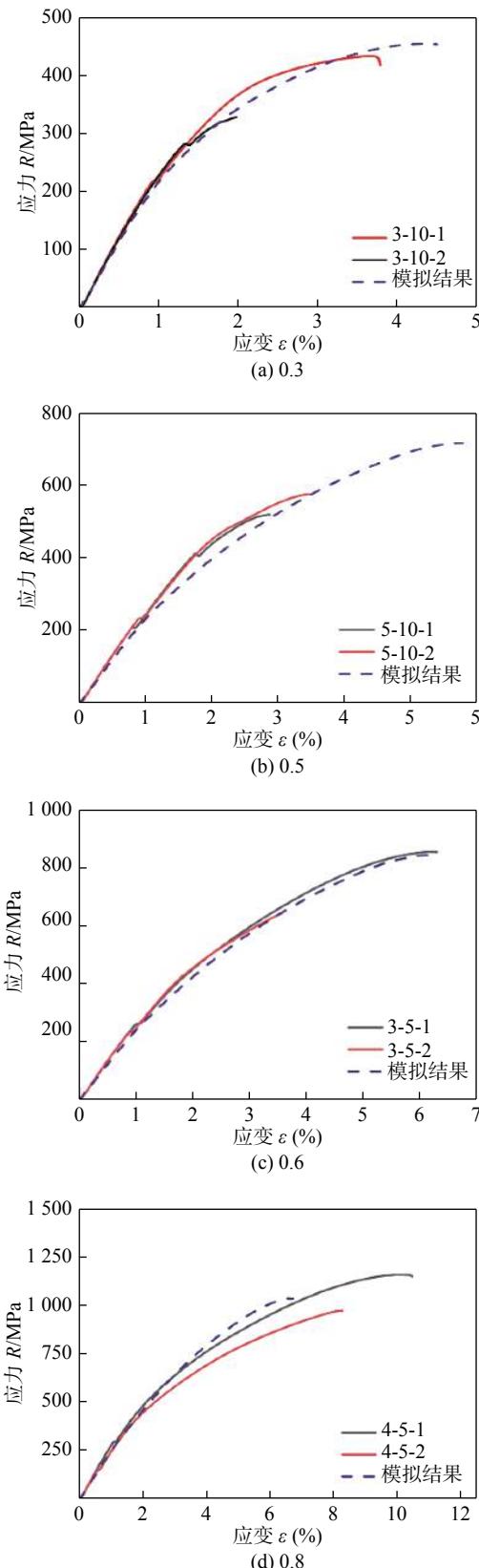


图 8 不同复合比的模拟与试验结果的对比

Fig. 8 Comparisons of stress-strain curves with different clad ratios from experiment and FE analysis.  
(a) 0.3; (b) 0.5; (c) 0.6; (d) 0.8

耦合约束“TIE”模拟了热轧复合工艺生产的钛-钢复合板的拉伸过程,其结果与试验结果吻合良好。因此,钛/铝之间的两个表面也采用“TIE”约束,这种耦合约束将两个组成层之间的表面完全绑定在一起,实现变形过程中的同步运动。同时,在几何模型一端施加固定载荷,另一端施加位移来模拟拉伸过程中的载荷。模型采用C3D8R网格,缺口处的网格尺寸设置为0.5 mm,其余部位为1 mm,从而减少计算时间。由图8可知,由于每个试验试样的结合质量不完全相同,因此模拟结果与试验结果存在误差,但整体看来,试验结果与有限元结果吻合较好。因此,利用已验证的有限元模型,补充了复合比为0.2,0.36,0.4,0.56,0.7,0.76和0.84的钛/铝复合材料拉伸试验。图9为不同复合比下所获得的拉伸强度和屈服强度的试验和模拟结果。对试验数据和有限元分析数据进行线性拟合,得到复合比与钛/铝复合材料抗拉强度与屈服强度的关系式如下

$$R_m = 1147.63877\beta + 132.2366 \quad (1)$$

$$R_{eH} = 584.13442\beta + 125.18291 \quad (2)$$

等式(1)和等式(2)的拟合系数分别为0.98279和0.98049,等式与试验和模拟数据吻合良好。此

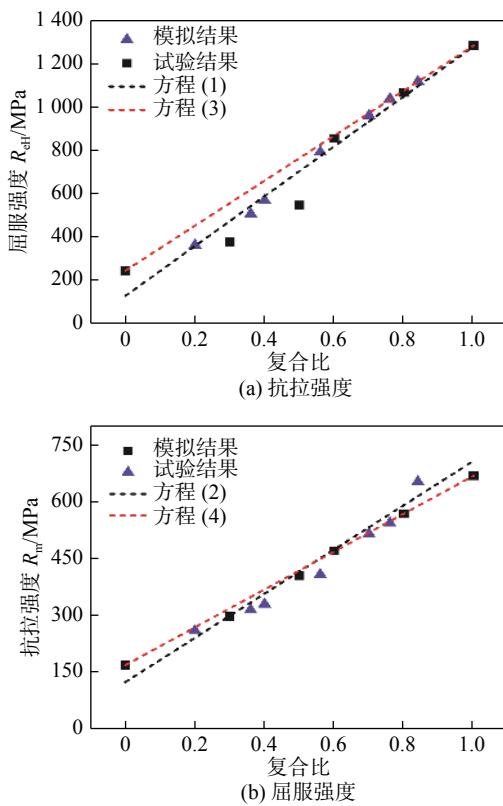


图9 预测等式的拟合结果

Fig. 9 Fitting results of prediction equation. (a) tensile strength; (b) yield strength

外,根据Liu等人<sup>[25]</sup>提出的包覆率与钛-钢力学性能的关系式

$$R_m = \sigma_{uc}\beta + \sigma_{us}(1-\beta) \quad (3)$$

$$R_{eH} = \sigma_{0.2c}\beta + \sigma_{0.2s}(1-\beta) \quad (4)$$

式中: $R_{mc}$ 和 $R_{ms}$ 分别是钛复层和铝基层的抗拉强度, $R_{eHc}$ 和 $R_{eHs}$ 分别为钛复层和铝基层的屈服强度,由图9可知,理论结果与试验和数值结果吻合良好,证明钛/铝复合材料的抗拉强度和屈服强度与复合比的关系也符合等式(3)和等式(4)。

### 3 结论

(1) 在钛/铝结合界面处观察到一定厚度的中间反应层,并且进行了一定范围的元素扩散,主要扩散元素包括Ti,Al,Mg和V,表明钛/铝结合质量良好。测得界面附近的硬度介于钛侧和铝侧之间。

(2) 总结了不同复合比对钛/铝复合材料应力—应变曲线和力学性能参数的影响。由于铝与钛之间发生了冶金结合,两组成层在拉伸变形过程中相互影响。随着复合比的增加,抗拉强度和屈服强度增加。但断后伸长率受钛/铝冶金结合影响较大,当复合比较低时,其局部断后伸长率甚至小于单一沉积铝,随着复合比的增加,其局部断后伸长率逐渐增大。

(3) 利用ABAQUS有限元软件模拟了钛/铝复合材料的抗拉过程,补充了多组复合比下的抗拉强度和屈服强度,有限元与试验结果整体吻合较好。基于有限元和试验数据,得到了抗拉强度、屈服强度与复合比的关系式。

### 参考文献

- [1] 陈连生,张鑫磊,郑小平,等.轧制双金属复合板材的研究现状[J].稀有金属材料与工程,2018,47(10): 3243–3250.  
Chen Liansheng, Zhang Xinlei, Zheng Xiaoping, et al. Research status of bimetal laminated composite plate prepared by rolling process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(10): 3243 – 3250.
- [2] 刘雪峰,白于良,李晶琨,等.冷轧成形钛/钢层状复合板界面结合强度的影响因素[J].材料工程,2020,48(7): 119–126.  
Liu Xuefeng, Bai Yuliang, Li Jingkun, et al. Influence factors of interfacial bonding strength of cold rolled titanium/steel laminated composite plates[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(7): 119 – 126.

- [3] Chu Q L, Tong X W, Xu S, et al. Interfacial Investigation of explosion-welded titanium/steel bimetallic plates[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(1): 78 – 86.
- [4] Woo Y Y, Oh I Y, Hwang T W, et al. Analysis of shape defects during flexible roll forming of steel/aluminum double-layered blanks[J]. International Journal of Material Forming, 2020, 13(6): 861 – 872.
- [5] Xiao H, Xu P P, Qi Z C, et al. Preparation of steel/aluminum laminated composites by differential temperature rolling with induction heating[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(2): 231 – 239.
- [6] Keller C, Moisy F, Nguyen N, et al. Microstructure and mechanical properties characterization of architected copper aluminum composites manufactured by cold-drawing[J]. Materials Characterization, 2021, 172: 1 – 10.
- [7] Chen Y, Wang A Q, Tian H W, et al. Study on optimization of nozzle for copper-aluminium clad plate twin-roll cast-rolling[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10: 1075 – 1085.
- [8] Yu W X, Liu B X, Chen C X, et al. Microstructure and mechanical properties of stainless steel clad plate welding joints by different welding processes[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2020, 25(7): 571 – 580.
- [9] Ban H Y, Bai R S, Chung K F, et al. Post-fire material properties of stainless-clad bimetallic steel[J]. Fire Safety Journal, 2020, 112: 1 – 10.
- [10] Zhou Y F, Qin G K, Li L, et al. Formability, microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V deposited by wire and arc additive manufacturing with different deposition paths[J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2020, 772: 1 – 10.
- [11] Yang Q F, Xia C J, Deng Y Q, et al. Microstructure and mechanical properties of AlSi7Mg0.6 aluminum alloy fabricated by wire and arc additive manufacturing based on cold metal transfer (WAAM-CMT)[J]. Materials, 2019, 12(16): 2525.
- [12] Choi J W, Liu H H, Fujii H. Dissimilar friction stir welding of pure Ti and pure Al[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 730: 168 – 176.
- [13] Sun Y B, Zhao Y Q, Zhang D, et al. Multilayered Ti-Al intermetallic sheets fabricated by cold rolling and annealing of titanium and aluminum foils[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(8): 1722 – 1727.
- [14] 祁梓宸, 余超, 肖宏, 等. 异温轧制备钛/铝复合板的变形协调性与复合性能 [J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(6): 1120 – 1127. Qi Zichen, Yu Chao, Xiao Hong, et al. Deformation coordination compatibility and bonding properties of Ti/Al composite plates prepared by different temperature rolling[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(6): 1120 – 1127.
- [15] Ege E S, Inial O T. Stability of interfaces in explosively-welded aluminum-titanium laminates[J]. Journal of Materials and Science Letter, 2000, 19(17): 1533 – 1535.
- [16] Guo X Z, Fan M Y, Liu Z L, et al. Explosive cladding and hot pressing of Ti/Al/Ti laminates[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(5): 1192 – 1196.
- [17] Huang H G, Chen P, Ji C. Solid-liquid cast-rolling bonding (SLCRB) and annealing of Ti/Al cladding strip[J]. Materials & Design, 2017, 118: 233 – 244.
- [18] 田银宝, 申俊琦, 胡绳荪, 等. 丝材 + 电弧增材制造钛/铝异种金属反应层的研究 [J]. 金属学报, 2019, 55(11): 1407 – 1416. Tian Yinbao, Shen Junqi, Hu Shensun, et al. Study of the reaction layer of Ti and Al dissimilar alloys by wire and arc additive manufacturing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(11): 1407 – 1416.
- [19] Williams S W, Martina F, Addison A, et al. Wire plus arc additive manufacturing[J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(7): 641 – 647.
- [20] Horgar A, Fostervoll H, Nyhus B, et al. Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259: 68 – 74.
- [21] Wang F D, Williams S, Colegrove P, et al. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V[J]. Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 2013, 44A(2): 968 – 977.
- [22] Martina F, Colegrove P A, Williams S W, et al. Microstructure of Interpass Rolled Wire plus Arc Additive Manufacturing Ti-6Al-4V Components[J]. Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 2015, 46A(12): 6103 – 6118.
- [23] Tian Y B, Shen J Q, Hu S S, et al. Wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V/Al-6.25Cu dissimilar alloys by CMT-welding: effect of deposition order on reaction layer[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2020, 25(1): 73 – 80.
- [24] 韩建超, 刘畅, 贾燚, 等. 钛/铝复合板研究进展 [J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(6): 1270 – 1280. Han Jianchao, Liu Chang, Jia Yi, et al. Research progress on titanium/aluminum composite plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(6): 1270 – 1280.
- [25] Liu X P, Bai R S, Uy B, et al. Material properties and stress-strain curves for titanium-clad bimetallic steels[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162: 1 – 10.
- [26] 班慧勇, 白日升, 刘明, 等. 钛-钢复合钢材力学性能及本构模型研究 [J]. 工程力学, 2019, 36(7): 57 – 66. Ban Huiyong, Bai Risheng, Liu Ming, et al. Study on the material properties and constitutive model of titanium-clad steel[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(7): 57 – 66.

**第一作者:** 夏玉峰, 博士, 教授, 博士研究生导师; 主要从事模具寿命提高研究、模具再制造设计与制造系统等新工艺、新方法研究; Email: yfeng\_xia@sina.com.

(编辑: 张基隆)