

退火温度对 TA1/X65 爆炸复合板微观组织与力学性能的影响

吴江涛, 李南南

(西安天力金属复合材料股份有限公司 层状金属复合材料国地联合工程研究中心, 陕西 西安 710201)

摘要: 以 X65 钢板为基板, TA1 钛板为覆板, 采用爆炸复合法制备 TA1/X65 复合板, 并分别在 500、550、600 °C 对其进行退火处理, 保温时间为 3 h。采用金相显微镜和场发射扫描电子显微镜附带的电子背散射衍射仪 (EBSD) 进行微观组织观察和晶体结构分析, 采用电子万能试验机和显微硬度计进行拉伸性能和显微硬度测试, 分析退火工艺和显微组织变化对材料力学性能的影响。结果表明, 试样在退火过程中发生再结晶, 形成细小的等轴晶, 且随着退火温度的升高, 强度降低, 塑性提高。此外, 由于复合板结合界面处形成了金属间化合物, 硬度最高, 达到 384.1 HV0.1。

关键词: TA1/X65 复合板; 热处理; 再结晶; 显微硬度; 金属间化合物

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)05-024-06

Influence of Annealing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of TA1/X65 Explosive Clad Plate

Wu Jiangtao, Li Nannan

(National-Local Joint Engineering Research Center for Laminated Metal Composite Material,
Xi'an Tianli Clad Metal Materials Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

Abstract: The TA1/X65 clad plate was fabricated using explosive welding with X65 steel plate as the base layer and TA1 titanium plate as the cladding layer. The clad plate was then annealed at 500, 550, and 600 °C for a holding time of 3 hours. Microstructure observation and crystal structure analysis were conducted using metallographic microscopy and electron back scattering diffraction (EBSD) of field-emission scanning electron microscope. Tensile properties and microhardness were tested using an electronic universal testing machine and a microhardness tester. The effects of annealing processes and microstructure changes on the mechanical properties of the material were analyzed. The results show that the recrystallization occurs in the sample during the annealing process, forming fine equiaxed grains. As the increasing of annealing temperature, the strength decreases while plasticity improves. Due to the formation of intermetallic compounds at the interface, the hardness (384.1 HV0.1) is significantly higher than that of the two base materials.

Keywords: TA1/X65 clad plate; heat treatment; recrystallization; microhardness; intermetallic compounds

爆炸焊接是一种借助炸药爆炸产生的冲击波作用力, 将两种或两种以上不同金属材料连接在一起的方法, 通常用于物理化学性能相差较大的异种金属焊接, 比如钛-钢、铜-钢等。爆炸焊接后, 金属界面形成典型的正弦波状结合, 界面结合质量良好, 结合强度高, 力学性能优异^[1-2]。爆炸焊接技术在大尺寸及异形结构复合材料制备中具有独特优势, 已广泛应用于能源电

力、航空航天、石油化工、海洋工程等领域^[3-6]。

通过爆炸焊接技术制备的 TA1/X65 钛钢复合板, 既具有较高的强度、韧性及优良的耐腐蚀性能, 又具有明显的成本优势。利用 TA1/X65 复合板制作的输油管线, 不仅能够提高输送效率和安全性, 而且适用于深水和寒冷地区^[7]。

然而, 爆炸焊接制备的复合材料存在界面残余应力大、结合质量不稳定以及加工硬化等问题, 严重影响复合板的力学性能和使用寿命^[8-9]。TA1 纯钛与 X65 钢的物理化学性质差异较大, 冶金相容性差, 在爆炸复合过程中易产生硬脆的金属间化合物, 如 TiFe、

收稿日期: 2025-02-26

基金项目: 层状金属复合材料创新中试平台项目 (2024CX-GXPT-20)

通信作者: 李南南 (1992—), 男, 工程师。

TiFe₂、TiNi、TiC、TiCr₂ 等。金属间化合物一方面可以阻碍界面剥离或滑移, 提高复合板的界面结合强度, 另一方面会降低复合板的界面韧性, 导致界面萌生微裂纹并进一步扩展, 从而降低复合板的抗拉强度和塑性^[10-11]。通过退火处理可以优化复合板的微观组织与力学性能, 促进界面处元素相互扩散和组织相变, 减少金属间化合物, 降低残余应力, 提高复合板的耐腐蚀性能和塑性^[12-13]。提高退火温度能够促进晶粒长大, 从而降低晶界的阻碍作用, 促进滑移系启动, 增加复合材料的塑性变形能力^[14]。但是, 退火温度过高会导致复合板的断裂韧性降低, 这是因为温度过高会促进界面处金属间化合物的生成或长大, 从而增加界面处的应力集中和裂纹萌生, 降低复合板的塑性变形能力^[15]。

目前, 国内外关于退火温度对爆炸复合板组织与性能影响的研究大多集中于单一材料体系或固定工艺参数, 而对 TA1/X65 这类钛钢复合板界面扩散行为及力学性能随退火温度的演变规律缺乏系统性研究。为此, 考察了不同退火温度下 TA1/X65 复合板的组织演变与性能变化规律, 阐明了退火温度对界面结合强度、元素扩散行为的作用机制, 同时揭示了其对金属间化合物形成及微观组织演变的影响。

1 实验

以 20 mm 厚 X65 钢板为基板, 2 mm 厚 TA1 钛板为覆板, 采用爆炸复合法制备 TA1/X65 复合板。如图 1 所示, 从远离爆轰点的一侧沿爆炸焊接方向(与板材轧制方向一致)在复合板上取样。采用箱式电阻炉对 TA1/X65 复合板进行退火处理。复合板随炉升温, 分别在 500、550、600 °C 保温 3 h 后空冷。从退火处理前与退火后的 TA1/X65 复合板上取样, 用金相水砂纸打磨、抛光后, 使用 HF+HNO₃+HCl+H₂O (体积比为 1:1:2:16) 腐蚀剂腐蚀 TA1 钛板一侧 10 s, 使用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀 X65 钢板一侧 40~45 s, 随后用无水乙醇擦拭试样表面。采用光学显微镜观察结合界面两侧基覆板的微观组织。采用 ZEISS Gemini 300 扫描电子显微镜 (SEM) 附带的电子背散射衍射仪 (EBSD) 进行晶体结构分析, 并使用 HKL Channel5 软件分析 EBSD 数据。沿 TA1/X65 复合板爆炸焊接方向且垂直于复合界面截取室温拉伸试样, 其平行段长度为 35 mm, 宽度为 6 mm, 厚度为 4 mm。利用 CSS-44100 型万能力学试验机进行拉伸试验, 拉伸速率为 1.5 mm/min。每组拉伸试验取 2 支平行试样, 以平均值作为测量结果。采用 HVS-1000 显微维氏硬度计进行显微硬度测试。

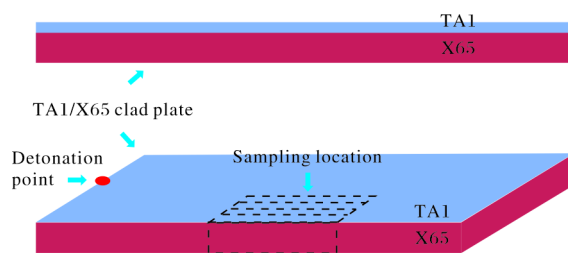


图 1 TA1/X65 复合板取样位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling location for TA1/X65 clad plate

2 结果与分析

2.1 基板与覆板微观组织

图 2 为基板 X65 钢板经不同温度退火后的金相显微组织。由图 2 可以看出, 爆炸态和热处理后的 X65 钢板组织均由珠光体 (黑色部分) + 铁素体 (白色部分) 组成。爆炸态 X65 钢板的结合界面附近, 晶粒明显被拉长、扭转, 发生塑性变形; 靠近 X65 钢板基体处, 组织为原始的轧制态组织, 晶粒沿轧制方向均匀分布。随着退火温度的升高, 铁素体数量减少, 珠光体晶粒尺寸变大, 晶界数量减少, 组织更加均匀^[16]。经 600 °C 退火处理后, 剧烈变形区域晶粒发生一定程度的长大, 但形态仍保持原始的轧制流线型, 与轧制方向一致。

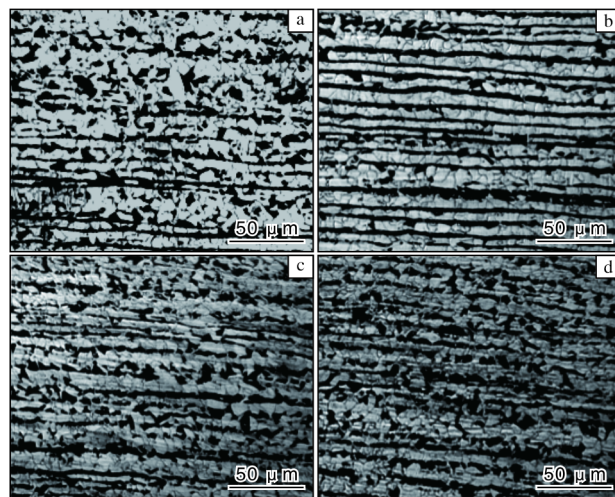


图 2 不同退火温度下 X65 钢板的金相照片

Fig.2 Metallographic microstructures of X65 steel plate annealed at different temperatures: (a) explosive state; (b) 500 °C; (c) 550 °C; (d) 600 °C

图 3 为覆板 TA1 钛板经不同温度退火后的金相照片。由图 3b 可以看出, 经 500 °C 退火处理后, TA1 钛板的显微组织与爆炸态原始组织 (图 3a) 相比变化较小。由于退火温度较低, 只有少部分组织发生了再结

晶, α 相中仍然残留有大量的纤维状组织, 并且纤维状组织沿 α 相晶粒的晶界呈一定角度分布。由图 3d

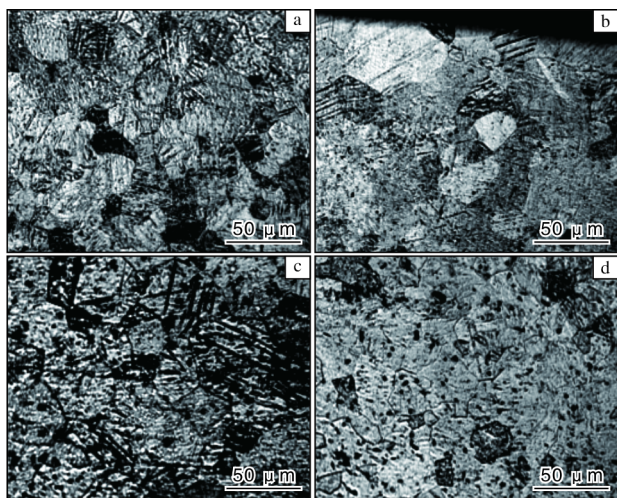


图3 不同退火温度下 TA1 钛板的金相照片

Fig.3 Metallographic microstructures of TA1 titanium plate annealed at different temperatures: (a) explosive state; (b) 500 °C; (c) 550 °C; (d) 600 °C

可以看出, 退火温度升高至 600 °C 时, TA1 钛板大部分区域发生了晶粒长大现象, 等轴晶组织明显, 结合界面组织更加均匀。与此同时, 纤维状组织随着组织内发生大量的再结晶现象而基本消失, α 相晶粒的晶界清晰可见^[17]。

2.2 结合界面再结晶组织

图 4 为爆炸态及 600 °C 退火态 TA1/X65 复合板结合界面的 EBSD 分析结果。从图 4a 爆炸态复合板的反极图 (IPF) 中可以看出, 爆炸态复合板中存在大量经过剧烈塑性变形的晶粒以及少量的再结晶晶粒, 说明爆炸焊接过程中发生了动态回复和再结晶。爆炸态和经 600 °C 退火复合板中的晶粒取向各不相同, 且爆炸态复合板中的晶粒尺寸差异较大。结合界面处, 形成了由其微小晶粒组成的晶粒带, 主要原因是爆炸焊接过程中覆板 TA1 对基板 X65 产生巨大的冲击力, 导致碰撞瞬间发生剧烈塑性变形的同时界面温度瞬间升高, 界面两侧金属材料均发生不同程度的再结晶。此外, 在结合界面漩涡处, 存在部分发生回复的晶粒, 其尺寸大于漩涡处的晶粒。

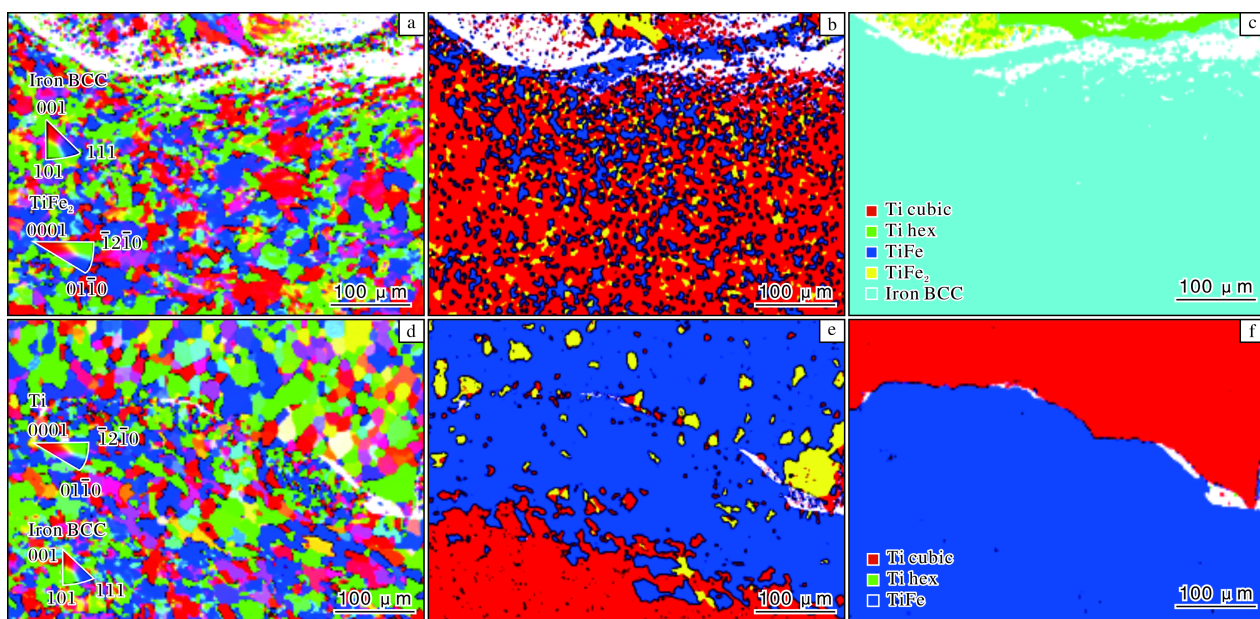


图4 爆炸态及 600 °C 退火态 TA1/X65 复合板结合界面的 EBSD 图

Fig.4 EBSD maps of TA1/X65 clad plate at bonding interface: (a) IPF map of clad plate in explosive state; (b) recrystallization map of clad plate in explosive state; (c) phase map of clad plate in explosive state; (d) IPF map of clad plate annealed at 600 °C; (e) recrystallization map of clad plate annealed at 600 °C; (f) phase map of clad plate annealed at 600 °C

从图 4b 爆炸态复合板的再结晶图可以看出, 结合界面处再结晶现象明显, 晶粒尺寸较小, 界面两侧基体的晶粒较大, 且距离界面越远, 晶粒尺寸越大。此外, 结合界面处还存在少量的变形晶粒以及发生回复但未再结晶的晶粒。基板 X65 因受到强烈的冲击作用

组织发生剧烈的塑性变形, 最终形成晶粒尺寸呈梯度变化的组织^[18]。

由图 4d、4e 可以看出, 经 600 °C 退火后, 结合界面两侧晶粒长大, 再次发生了再结晶现象, 从而导致再结晶程度增加, 塑性变形组织减少。对比图 4c、4f

可知, 经 600 °C 退火后, 结合界面处发生再结晶, 形成了铁钛合金相, 但 Ti 相和 Iron BCC 相含量减少^[19]。

2.3 结合界面小角度晶界及位错密度

图 5 为爆炸态及 600 °C 退火态 TA1/X65 复合板结合界面的晶界图及核平均取向差 (KAM) 图。由图 5a、5b 可以看出, 爆炸态及 600 °C 退火态复合板都存在小

角度晶界, 通过软件计算得到其占比分别为 66.0% 和 45.2%。与爆炸态复合板相比, 600 °C 退火态复合板的小角度晶界占比降低, 且其变化趋势与再结晶晶粒占比的变化趋势相反, 即随着退火温度的升高, 小角度晶界占比不断下降, 这是退火处理使得试样晶粒长大的结果^[20]。

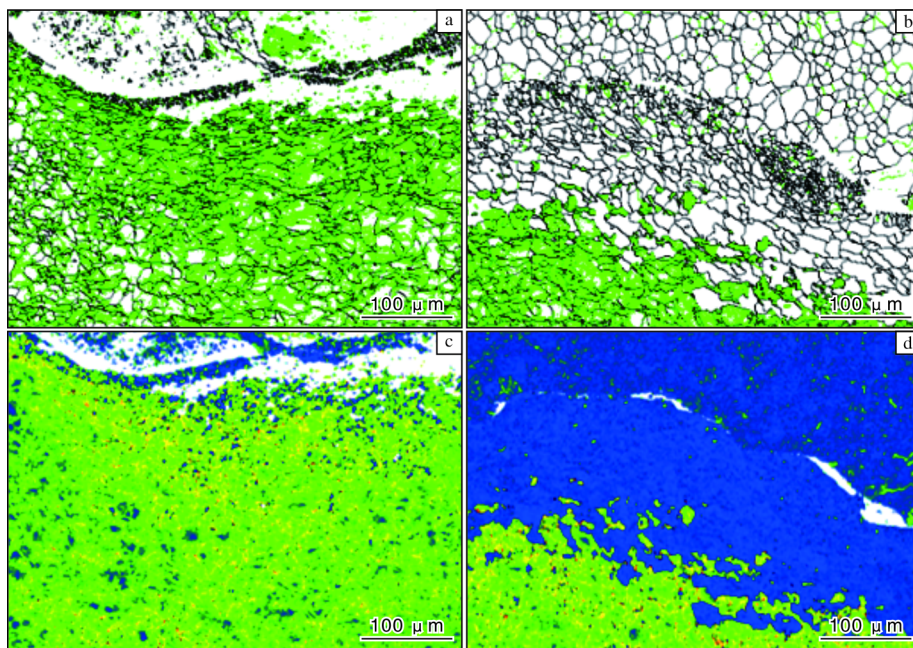


图 5 爆炸态及 600 °C 退火态 TA1/X65 复合板结合界面的晶界图及 KAM 图

Fig.5 Crystal boundary maps (a, b) and KAM maps (c, d) of TA1/X65 clad plate at bonding interface: (a, c) explosive state; (b, d) annealed at 600 °C

爆炸复合过程中, 结合界面两侧金属受到强烈冲击作用而发生剧烈塑性变形, 导致晶格畸变, 晶粒被破碎, 内部产生了较大的内应力。经过退火处理, 结合界面处破碎的组织发生再结晶, 内应力降低。随着退火温度的升高, 再结晶晶粒增多, 小角度晶界的占比下降。由图 5c、5d 可知, 退火后结合界面附近区域应力明显下降。这主要是因为退火后小角度晶界增多, 位错密度升高, 储存的畸变能增大所导致的。

2.4 显微硬度

TA1/X65 复合板的显微硬度分布曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出, TA1/X65 复合板结合界面处的显微硬度最高, 由界面处向基层和覆层方向硬度逐渐降低, 最后趋于平稳。爆炸焊接过程中, 结合界面处因强烈的爆炸冲击力作用而产生剧烈的塑性变形, 加工硬化效应显著, 硬度得到大幅提升。同时, 产生的瞬时高温使界面处产生再结晶效应, 形成很多细小的再结晶晶粒, 最终导致结合界面处硬度增大^[21]。随着与界面距离的增加, 板材所承受的爆炸载荷作用逐渐减小, 其加工硬化效应减弱, 硬度逐渐趋于平稳。在

远离结合界面的测试区域, 硬度略高于母材。这是由于母材的各个部位在爆炸载荷的压力作用下, 产生了一定的塑性变形, 发生了不同程度的加工硬化^[22-23]。

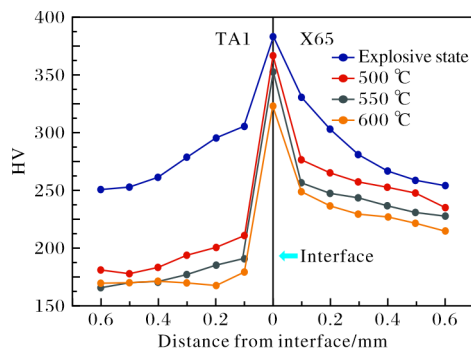


图 6 TA1/X65 复合板显微硬度分布曲线

Fig.6 Microhardness distribution curves of TA1/X65 clad plate

当退火温度为 500 °C 时, 组织变化不明显, 因而复合板结合界面处的显微硬度值 (366.1 HV0.1) 相比于爆炸态复合板 (硬度为 334.1 HV0.1) 仅略有降低。随着退火温度升高, 复合板结合界面处的硬度逐渐降

低，主要是由于组织发生了再结晶，原本被剧烈冲击破碎的组织重新形核并逐渐长大，最终形成尺寸较大的晶粒。

2.5 拉伸性能

TA1/X65 复合板的室温拉伸应力-应变曲线见图 7，拉伸性能见表 1。由图 7 和表 1 可知，爆炸态复合板的强度高但塑性差，断后伸长率仅为 11.29%。随着退火温度的升高，复合板的强度逐渐降低，塑性逐渐增大，这是由于随着退火温度升高，再结晶得以充分进行，界面元素相互扩散，消除了部分残余应力。TA1/X65 复合板经 600 ℃退火后的抗拉强度为 447.87 MPa，屈服强度为 327.82 MPa，断后伸长率为 28.77%。

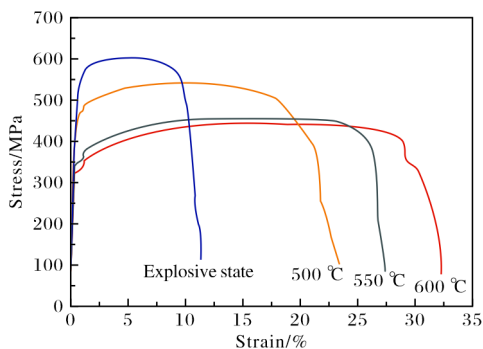


图 7 TA1/X65 复合板经不同温度退火后的室温拉伸应力-应变曲线

Fig.7 Room-temperature stress-strain curves of TA1/X65 clad plate annealed at different temperatures

表 1 TA1/X65 复合板经不同温度退火后的拉伸性能

Table 1 Room-temperature tensile properties of TA1/X65 clad plate annealed at different temperatures

Sample	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%
Explosive state	603.69	522.56	11.29
Annealed at 500 ℃	546.46	455.28	23.43
Annealed at 550 ℃	460.65	347.85	27.45
Annealed at 600 ℃	447.87	327.82	28.77

3 结 论

(1) 采用爆炸复合法制备的 TA1/X65 复合板，在退火过程中发生再结晶，小角度晶界减少，等轴晶晶粒细小，界面元素相互扩散，部分残余应力得以消除。当退火温度达到 600 ℃时，TA1 覆层充分再结晶，等轴晶清晰可辨，纤维状组织基本消失。

(2) 经爆炸复合后，TA1/X65 复合板界面处形成了金属间化合物，硬度远高于两侧基体，达到 384.1 HV0.1，且由结合界面向两侧基体梯度递减。

(3) 随着退火温度的升高，TA1/X65 复合板的强度降低，塑性提高，硬度值下降。当退火温度达到 600 ℃时，抗拉强度为 447.87 MPa，屈服强度为 327.82 MPa，断后伸长率为 28.77%。

参考文献 References

- [1] 王恒, 李国艳, 李莎, 等. 铜/钢复合板制备工艺及界面调控研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35(1): 99-125.
- [2] 冯健, 姜超, 侯国亭, 等. 异种金属爆炸焊接工艺参数计算与实验验证[J]. 材料导报, 2024, 38(S2): 457-460.
- [3] 吕琪. 爆炸焊接 TA1/2A12 复合板的轧制组织与性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2024.
- [4] 张莉莉. 中间层对 5083Al/SUS316 爆炸复合板作用机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024.
- [5] 张群兵, 张阔, 于佳恩, 等. TC17/Ti60 异种钛合金激光焊接接头微观组织和低周疲劳性能研究[J]. 钛工业进展, 2024, 41(4): 23-29.
- [6] Zhang W B, Yang H J, Liu C R, et al. Numerical simulation and experiment analysis of N6/45# composite plate prepared by explosive welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(6): 1592-1600.
- [7] 毕宗岳, 杨军, 刘海璋, 等. TA1/X65 复合板焊接工艺及焊缝组织和性能研究[J]. 金属学报, 2016, 52(8): 1017-1024.
- [8] 宋丽平, 张保林, 高章虎. TA1/X65 复合板焊后残余应力的数值模拟分析[J]. 焊接技术, 2020, 49(2): 14-16.
- [9] 冯健, 侯国亭, 刘献甫, 等. 爆炸焊接大厚度 BFe10-1-1/钢复合板复合界面缺陷形成机理研究[J]. 工程技术研究, 2018(10): 93-94.
- [10] 宋慷慨, 张聪惠, 李南南, 等. 退火温度对 1060Al/TA2/CCSB 爆炸复合板结合界面微观组织与力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(9): 3097-3105.
- [11] 宋从斌, 张聪惠, 朱文光, 等. 5083Al/1060Al/TA1/Ni/SUS304 五层爆炸复合板退火组织演化及力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(5): 1737-1745.
- [12] Zu G Y, Sun X, Zhang J H. Interfacial bonding mechanism and mechanical performance of Ti/Steel bimetallic clad sheet produced by explosive welding and annealing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(4): 906-911.
- [13] 穆晓彪, 潘涛, 熊玮, 等. 热处理温度对铝-铝-钢与铝-钛-钢爆炸复合板界面组织与性能的影响[J]. 材料导报, 2023, 37(19): 199-204.
- [14] Yuan J X, Shao F, Bai L Y, et al. Interface characteristics and mechanical properties of titanium/aluminum composites with an interlayer fabricated by explosive welding[J]. Journal of Central South University, 2024, 31(1): 43-58.

- [15] Li B X, Niu J L, Feng Z B, et al. Influence of warm rolling path on shear strength of explosively welded Ti/steel clad plate[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(6): 2010-2016.
- [16] 朱瑞园, 程焜, 田春茂, 等. 热等静压增材制造 Ti-6Al-4V/316L 叠层双金属研究[J]. *中国有色金属学报*, 2025, 35(2): 515-528.
- [17] Yang M, Zhang B Y, Ma H H, et al. Microstructure and grain evolution mechanisms of copper/steel explosive welding interface[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2024, 34(5): 1588-1605.
- [18] 付霄荧, 周增林, 李艳, 等. 退火温度对交叉轧制铝箔显微组织、织构及性能的影响[J]. *稀有金属*, 2022, 46(2): 137-143.
- [19] 郑磊, 徐达, 鲁宇杰, 等. 激光增材制造 316L 不锈钢退火过程中微观组织演变和力学性能[J]. *金属热处理*, 2024, 49(4): 66-77.
- [20] 杨文月, 孙倩, 李冰, 等. 钛钢爆炸焊接结合界面组织及力学性能不均匀性研究[J]. *压力容器*, 2021, 38(12): 15-21.
- [21] Ren G Z, Zhang Y, Zhou J P, et al. Titanium/steel composites were prepared by composite interlayer and two pass laser welding[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 6367-6375.
- [22] 孙倩, 陈菁, 崔晓玉, 等. 钛/钢复合板显微组织及拉伸和疲劳断口分析[J]. *兵器材料科学与工程*, 2021, 44(3): 128-132.
- [23] 刘润生, 张杭永, 郭龙创. 爆炸焊接装药方式对钛/钢复合板组织及性能的影响[J]. *钛工业进展*, 2014, 31(3): 34-38.

研究简报

用于预测金属增材制造中柱状晶到等轴晶转变的成分准则

在金属增材制造 (AM) 领域, 精确控制凝固过程中的柱状晶向等轴晶转变 (CET) 是获得各向同性优异力学性能的关键。然而, 传统铸造理论中建立的主要成分预测参数: 非平衡凝固范围 (ΔT_s)、生长限制因子 (Q) 及成分过冷参数 (P), 在面临 AM 特有的高冷却速率和大温度梯度工况时, 其适用性一直存在争议, 亟需建立适用于 AM 工艺的可靠理论框架。

为此, 以钛合金为研究载体, 旨在系统评估上述三类成分参数在激光束直接能量沉积 (DED-LB) 制备 Ti-Fe、Ti-Cu、Ti-Cu-Fe 及 Ti-Mo 等钛合金体系中的效能, 明确适用于 AM 工艺的 CET 可靠预测指标, 为高性能 AM 合金的成分设计构建清晰理论框架。

首先, 通过控制工艺参数 (如激光功率、扫描速度等) 与粉末粒度分布以隔离成分对显微结构的影响, 再采用 CALPHAD 热力学计算工具计算 ΔT_s 、 Q 及 P 的数值, 借助电子背散射衍射技术表征晶粒形貌并完成母相 β 晶粒重构, 结合 Hunt 解析模型与 Kurz-Gäumann-Trivedi (KGT) 数值模型模拟 CET 过程, 并进行理论验证与机制阐释。此外, 对比了激光粉末床熔融 (PBF-LB) 制备的铝合金 (Al-Si, Al-Cu, Al-Ni) 及文献中其他合金体系的 AM 数据, 以验证结论的普适性。

研究表明, P 是 AM 工艺下预测 CET 最可靠的成分参数。在钛合金体系中, Q 与 P 的升高均能促进 CET 及晶粒细化, 而 ΔT_s 与晶粒形貌无显著相关性。对于 Ti-Fe、Ti-Cu 合金, 通过提升 P 值可实现完全等轴晶转变, 而 Ti-Mo 合金虽 Q 值较高, 但 P 值偏低, 在相同工艺参数下仍保持柱状晶形态; KGT 模型因适配 AM 快速凝固的特性, 揭示了高凝固速率下 P 与枝晶尖端过冷度存在紧密关联, 而 Hunt 模型更适用于传统铸造场景; 在 PBF-LB 制备的铝合金体系中, 即便考虑溶质截留对溶质分配系数的影响, 并进行参数修正后, P 与 CET 及晶粒细化的相关性 ($R^2=0.81$) 仍显著优于 ΔT_s ($R^2=0.20$) 与 Q ($R^2=0.33$)。

此项工作确立了 P 参数在 AM 合金设计中的核心地位, 为 AM 合金的成分设计与显微结构精准调控提供了关键理论支撑, 推动了凝固理论从“铸造导向”向“AM 导向”的范式转变, 也为解决 AM 材料力学性能均一性问题提供了新的技术路径。未来, 通过将 P 参数与机器学习等先进设计方法相结合, 有望实现定制化微观结构的精确调控, 为航空航天、生物医疗等领域高性能构件的 AM 奠定坚实基础。

罗莹、刘凡摘译自《Nature Communications》2025, 16