



电子束选区熔化增材制造 TiAl 合金及其 热处理工艺研究进展

王双赞¹, 葛庚午¹, 卢 东², 梁永锋^{1*}, 林均品¹

(1. 北京科技大学新金属材料全国重点实验室, 北京 100083; 2. 四川省先进金属材料增材制造工程技术研究中心, 攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 电子束选区熔化技术 (Electron Beam Melting, EBM) 是增材制造脆性 TiAl 合金部件的理想成形方法, 以实现 TiAl 合金复杂结构成形和优异性能。相较于其他增材制造方法, EBM 具有预热温度高、不易开裂、氧含量低等优势, 因而被广泛研究, 尤其是 Ti-48Al-2Cr-2Nb (4822) 合金。EBM 制备的 4822 合金平均晶粒尺寸通常小于 20 μm , 晶粒尺寸远小于传统铸造合金。EBM 制备的 4822 合金室温强度最高可达 600 MPa 以上, 但塑性较差且存在缺陷, 热等静压 (HIP) 和高温热处理 (HT) 是提升力学性能重要的后处理手段, 可将室温延伸率提升至 1.3%。然而, EBM 制备 TiAl 合金工艺及热处理还存在许多问题, 综述了近年来 EBM 增材制造 TiAl 合金及其热处理工艺的研究进展, 对目前存在的问题及应对措施进行了分析总结, 并对增材制造 TiAl 合金未来的发展方向进行了展望。

关键词: TiAl 合金; 增材制造; 电子束选区熔化; 热处理; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TF823

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)01-0036-13

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.01.005

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

Research progress on electron beam melting additive manufacturing of TiAl alloys and heat treatment processes

WANG Shuangzan¹, GE Gengwu¹, LU Dong², LIANG Yongfeng^{1*}, LIN Junpin¹

(1. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Sichuan Advanced Metal Materials Additive Manufacturing Engineering Technology Research Center, Pangang Group Panzhihua Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Electron Beam Melting (EBM) is an ideal forming method for additive manufacturing (AM) of brittle TiAl alloy components, enabling the formation of complex structures and the achievement of superior performance in TiAl alloys. Compared to other additive manufacturing techniques, EBM offers advantages such as high preheating temperatures, resistance to cracking, and low oxygen content, making it widely researched, especially for the Ti-48Al-2Cr-2Nb (4822) alloy. The average grain size of 4822 alloy prepared by EBM is typically less than 20 μm , significantly smaller than that of traditionally cast alloys. The room-temperature strength of 4822 alloy prepared by EBM can reach over 600 MPa, but it exhibits poor ductility and defects. Hot isostatic pressing (HIP) and high-temperature heat treatme-

收稿日期: 2025-03-20; 修回日期: 2025-04-07; 接受日期: 2025-04-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB3700500); 钒钛资源综合利用产业技术创新战略联盟资助项目 (PGWX2023006)。

作者简介: 王双赞, 1999 年出生, 男, 河南南阳人, 博士研究生, 研究方向为增材制造 TiAl 合金方面的基础研究, E-mail: wangshuangzan16@163.com; *通信作者: 梁永锋, 1980 年出生, 陕西宝鸡人, 博士, 教授, 研究方向为金属间化合物结构及功能材料, E-mail: liangyf@skl.ustb.edu.cn。

nt (HT) are important post-processing methods to enhance mechanical properties, increasing the room-temperature elongation to 1.3%. However, there are still many issues with the EBM process and HT of TiAl alloys. This paper reviews the recent research progress in EBM additive manufacturing of TiAl alloys and their HT processes, analyzes and summarizes the current problems and countermeasures, and provides an outlook on the future development direction of additive manufacturing of TiAl alloys.

Key words: TiAl alloy; additive manufacturing; electron beam melting; heat treatment; microstructure; mechanical properties

0 引言

TiAl 合金具有高熔点、低密度、高比强度以及综合力学性能优异等优点,受到航空航天和汽车发动机等领域的广泛关注^[1-5]。然而 TiAl 合金是典型的金属间化合物材料,在其长程有序结构中,可开动的独立滑移系有限,且有序结构对称性较低,本征脆性导致了 TiAl 合金室温塑性差^[6-8]。采用铸造等传统制造工艺面临加工成形困难的问题,尤其是难以成形具有复杂形状 TiAl 合金部件。

增材制造 (Additive Manufacturing, AM), 又称 3D 打印, 具有高自由度和近净成形的特点, 能够生产传统加工方法难以完成的复杂几何结构, 因此在航空航天、医疗等领域得到广泛应用^[9-10]。增材制造技术作为 TiAl 合金的一种新制备方法, 能够突破传统制造技术的形状和尺寸限制, 直接制造出具有复杂形状和内部结构的 TiAl 合金部件, 从而大幅提高产品的设计自由度和制造效率。电子束选区熔化 (EBM) 被发现是生产 TiAl 合金有前途的增材制造技术, 而激光技术目前不能满足必要的要求, 原因主要有开裂、尺寸精度及打印气氛非 EBM 的高真空环境等^[11-13]。然而, 尽管电子束增材制造技术在 TiAl 合金中已展现出巨大优势, 但如何进一步优化其制造工艺, 调控显微组织, 提高力学性能, 仍是当前研究的热点和难点。热处理是诸多合金中常见的提升力学性能的重要手段之一, 如 Ti 合金、高温合金、中熵合金等^[14-17]。同样, 热处理工艺也是改善 TiAl 合金显微组织和提升力学性能的重要途径^[18-19], 尤其是增材制造 TiAl 合金。通过合理的热处理, 可以消除打印过程中产生的残余应力, 优化 TiAl 合金的显微组织, 提高其力学性能。

笔者综述了近年来电子束增材制造 TiAl 合金及其热处理工艺的研究进展, 对比了激光与电子束增材制造的特点, 重点介绍了电子束增材制造技术制备 TiAl 合金的工艺特点和显微组织, 以及热处理工艺对增材制造 TiAl 合金显微组织和力学性能的影响等, 特别是 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金, 并对当前电子束增材制造 TiAl 合金及其热处理工艺研究中存在的问题和未来发展方向进行总结和展望。

1 TiAl 合金增材制造技术

目前, 激光选区熔化 (Selective Laser Melting, SLM)、激光金属沉积 (Laser Metal Deposition, LMD) 和电子束选区熔化 (EBM) 等技术已被广泛应用于 TiAl 合金的制备和研究。根据所用热源不同, 可分为激光增材制造和电子束增材制造 TiAl 合金。

1.1 激光增材制造 TiAl 合金

激光增材制造的能量源为激光, 根据供粉方式又可分为激光选区熔化和激光金属沉积。SLM 是目前金属增材制造中使用最普遍的技术之一, 已被用于 TiAl 合金及其复合材料的制备^[20]。SLM 是利用高功率、高密度的激光束对铺于基板上的粉末进行逐层扫描, 直至完成零件的建造。因为 SLM 技术采用的激光光斑直径小、扫描速度较快、显微组织精细、力学性能优异且尺寸精度高, 因而适于涡轮叶片等复杂形状构件的成形^[21-22]。但因其制造过程的反复加热, 冷却过程会产生较大的热应力和残余应力而导致试样开裂^[23]。虽然目前已经成功用于 Ti 合金及镍基高温合金零件的制备, 但在成形 TiAl 合金构件时难度较大, 易出现裂纹、Al 损失控制等问题^[24-27]。对于 SLM 制备 TiAl 合金中出现的开裂问题, 与 SLM 过程中冷却速率过快有关。诸多研究^[28-31]表明, 提高预热温度有利于获得致密无裂纹的 TiAl 合金, 但提高基板预热温度需对设备改造, 从而提高研究难度。因此, 对于具有本征脆性的 TiAl 合金, SLM 制备 TiAl 合金仍具有挑战性。

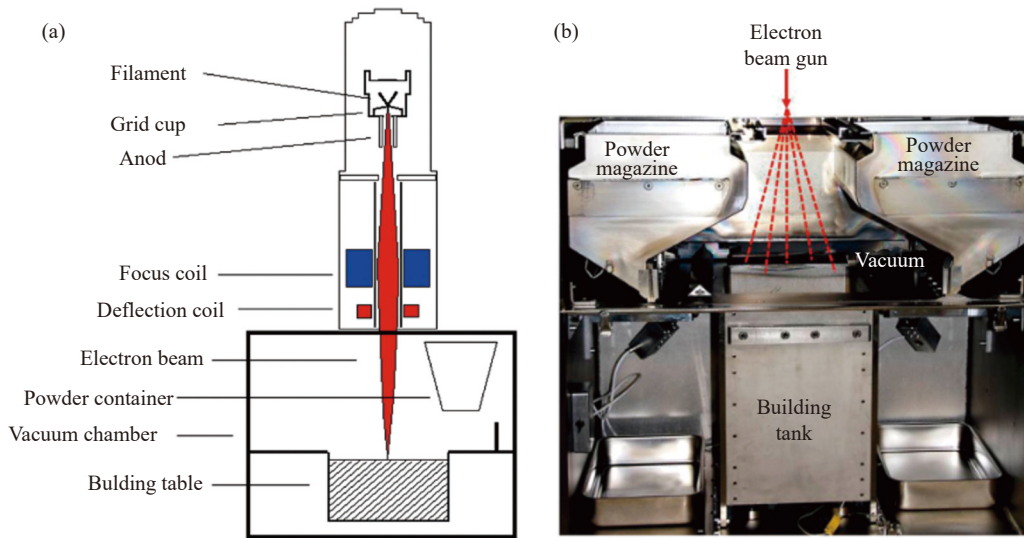
激光金属沉积的原理是按照预设路径在惰性气氛下, 利用高能激光束逐层熔化同轴送入的金属粉末或丝材, 逐层堆叠, 从而实现金属零件的近净成形与修复。LMD 的激光器功率较大, 激光光斑尺寸较大 (0.5 ~ 10 mm), 成形效率比 SLM 高 30 倍以上, LMD 热循环过程中的冷速比 SLM 冷速慢, 但 LMD 的成形件尺寸精度和表面质量稍差于 SLM。尽管 LMD 技术已能够制备出高致密度的 TiAl 合金部件, 但开裂问题仍然是制约其发展的主要挑战之一, 特别是在基板与沉积层交界区域^[11,32]。为此, 许多研究者将降低冷却速率作为解决这一

问题的关键方向。提高 SLM 预热温度需要对设备进行大幅改动, 严重增加成本; 而 LMD 的成形腔室空间较大, 这使得预热装置的安装相对简便^[33]。由于 LMD 技术采用送丝或送粉的方法, 便于添加纳米颗粒等复合材料增强体, 也被广泛研究制备 TiAl 基复合材料^[34-35]。综上所述, 开裂、尺寸精度及表面质量等仍是激光增材制造 TiAl 合金面临的主要问题。

1.2 电子束增材制造 TiAl 合金

电子束选区熔化技术是常见的电子束增材制造方法之一, 也被用于成形 TiAl 合金。EBM 由 Arcam 公司开发, 使用的是聚焦的高能高速电子束。EBM

结构示意图和设备图如图 1 所示^[36-37]。EBM 的生产过程主要有铺粉、电子束预热、扫描打印、调整高度并重复以上步骤完成试样打印。EBM 技术具有能量利用率高、预热温度高、成形质量好、材料利用率高及可对缺陷实时修复等优点。EBM 打印过程中预热温度高, 能防止成形过程中温差过大而产生较大的残余应力^[12]。EBM 在高真空中进行, 可以很好地控制氧含量, 较低的氧含量有利于对氧较为敏感的 TiAl 合金的打印。EBM 的诸多优点说明其适合生产 TiAl 合金, 但仍存在很多亟须解决的问题, 如易挥发元素含量不易控制、粉末质量要求较高、“吹粉”现象及显微组织不均匀等。



(a)结构示意图^[36]; (b)EBM 设备^[37]

图 1 EBM 结构示意图和设备

Fig. 1 Schematic diagram and equipment of EBM

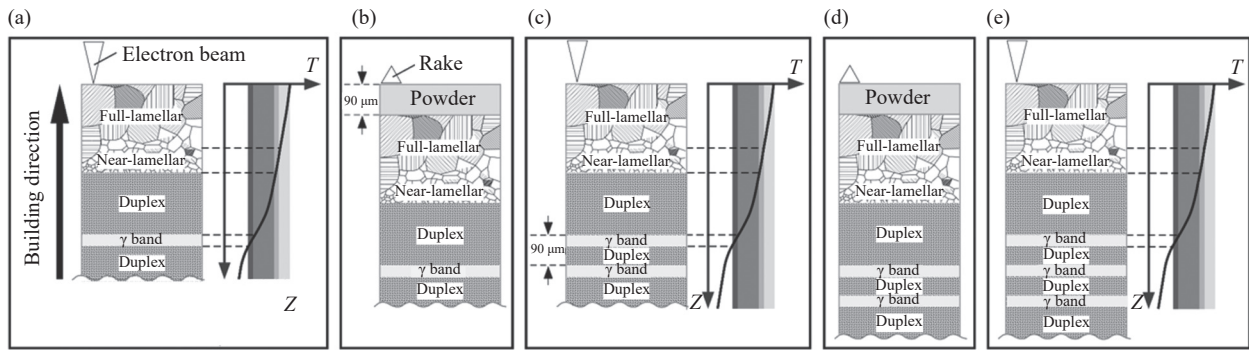
EBM 的工艺参数包括束流、扫描速度、线间距、层厚、散焦值等, 都会对 EBM 成形 TiAl 合金的显微组织产生重要影响。在保证致密无裂纹及未熔合等缺陷的前提下, 获得均匀细小的显微组织是 EBM 制备 TiAl 合金的目标。CORMIER 等^[38]在研究 EBM 成形 Ti-47Al-2Cr-2Nb 合金中发现, Al 损失相较于原料粉末达 7.37%(原子分数)。而 TiAl 合金的 Al 含量与显微组织密切相关, 从而影响其力学性能。目前, Al 含量控制问题可以通过提高粉末 Al 含量进行补偿、工艺参数优化从而降低 Al 损失等^[4,39]。在 EBM 工艺中, 对于降低 Al 损失起关键作用的光束参数之一(涉及线/区能量输入)是束流^[12]。BIAMINO^[36]和 MURR 等^[40]的研究都表明通过调整工艺参数可以使 Al 损失降至约 1%。YUE 等^[41]研究表明, 在所探索的体积能量输入范围内(14.28 ~ 35.0 J/mm³), 缺陷水平从 0.98% 降至

0.15% 左右, Al 损失增加到 2.63% 左右。MOHAMMAD 等^[42]进行的研究也证实了上述结果, 他们发现低能量值会导致较大比例的气孔产生, 通过适度提高区域能量, 孔隙率被大大消除, 从而提高了强度; 然而, 对于能量值较高的样品, Al 损失约 3.05%。KLASSEN 等^[43]研究了 EBM 成形 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金时能量输入与元素蒸发及孔隙率之间的关系, 发现通过采用合适的扫描策略能有效减少低熔点元素的蒸发。因此, 对于特定的熔化策略, 在孔隙率和 Al 损失之间需要合理权衡。

EBM 成形的 TiAl 合金通常表现出精细但不均匀的显微组织, 沿着打印方向呈双态组织和粗大 γ 晶粒交替分布的层状或带状结构, 即带状组织^[40,44-46]。目前, 对于带状组织的产生原因有多种解释。TODAI 等^[47]认为独特的层状显微组织的形成机理与 EBM 过程中反复的局部热处理密切相关, 随着

顶部的片层区域逐渐远离顶部, 退火温度随循环次数的增加而降低至($\alpha+\gamma$)双相区中部, 片层组织转变为双态组织; 随着温度降低至共析温度左右, 双态组织转变为 γ 相条带, 最终双态组织和 γ 条带组织交替分布形成带状组织(见图 2)。SEIFI 等^[48]则认为, 带状组织是双级联包晶反应演化的结果, 其中 α_2/γ 片层源于初生枝晶凝固产物 α 相, 而 γ 晶粒则形成于包晶反应 $\alpha+L\rightarrow\gamma$ 中。WARTBICHLER 等^[49]进一步研究发现带状组织呈现为贫 Al 区和富 Al 区, 带状组织形成还与 Al 的分布有关。因此, 带状组织

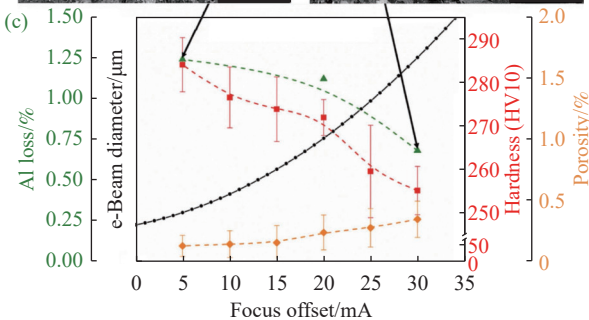
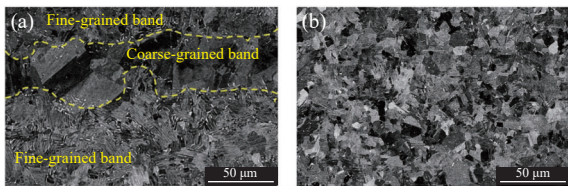
的形成较为复杂, 为获得均匀的显微组织, 应尽可能消除带状组织。GHIBAUDO 等^[50]研究了散焦对 EBM 制备的 TiAl 合金显微组织的影响, 通过增加散焦值获得了均匀、更精细的双态组织(见图 3), 从而证明了散焦值有可能影响 Al 损失, 有助于减轻带状组织的出现, 在均匀显微组织的产生中发挥重要作用。但随着散焦值的增加, 合金的显微硬度逐渐降低, 而孔隙率逐渐增加。因此, 在调控 EBM 制备 TiAl 合金显微组织均匀性时, 也需关注孔隙率变化, 减少打印缺陷。



(a) EBM 过程简要说明; (b) 铺设粉末; (c) 熔合多层; (d) 铺设下一层粉末; (e) 再次熔合多层

图 2 EBM 制备 TiAl 合金的显微组织演化和独特的显微组织形成示意^[47]

Fig. 2 Schematic of microstructural evolution and the formation of unique layered microstructure in TiAl alloy fabricated by EBM^[47]



(a) 带状组织; (b) 均匀组织; (c) 电子束光斑尺寸(黑色)、铝损失(原子含量)(绿色)、硬度(红色)和孔隙率(橙色)随散焦值的变化

图 3 EBM 制备 TiAl 合金的显微组织及电子束光斑尺寸、铝损失、硬度和孔隙率随散焦值的变化^[50]

Fig. 3 Microstructure of TiAl alloy prepared by EBM, and variations of the electron beam spot size, Al loss, hardness, and porosity with the FO^[50]

EBM 的各种加工参数在很大程度上影响温度场及冷却条件, 并随之改变了成形后的显微组织特征(如相种类、相含量、晶粒尺寸等)和残余应力^[12,51]。SCHWERDTFEGER 等^[52]用较高的线能量(1.1 J/mm)

制造的部件几乎形成了全片层结构(片层团大小在 10 ~ 30 μm), 而用较低的线能量(0.15 J/mm)制造的部件只形成了极少量的片层区域。这表明, 高扫描速度下的高冷却率(低线能量输入)足以导致显著的 γ 相变, 通过降低线能量, 可以发现显微组织也变得更为精细。MOHAMMAD 等^[42]研究也发现较低的能量产生了较大的等轴结构, 而较高的能量则产生了全片层的形态, 只有适当的区域能量水平才能产生双态结构, 此外还证实了显微组织沿构建方向从上到下逐渐粗化的现象。在 EBM 工艺过程中, 每一层多次循环熔化、冷却和重熔的重要结果之一就是残余应力的形成, 它会影响到零件的完整性、开裂和力学性能^[53]。残余应力主要可归因于较大的热梯度或冷却差, 较低的冷却速率有助于减少残余应力, 因为充分的应力释放时间^[12]。GALATI 等^[53]发现 Ti-48Al-2Cr-2Nb 的上表面拉应力几乎低于 50 MPa。与其他样品相比, 线偏移量最大(300 μm)的样品上表面残余应力最小, 较小的线偏移值增加了重熔的频率, 这表明残余应力的振荡行为更加明显。此外, 不同的冷却速度可能会导致观察到的顶面和侧面之间的残余应力有差异。侧表面的应力通常大于顶表面的应力。

2 增材制造 TiAl 合金的热处理

2.1 增材制造 TiAl 合金的热处理工艺

增材制造 TiAl 合金的热处理是为了解决制造过程中产生的残余应力、缺陷、显微组织不均匀、力学性能不足等问题。通过合理的热处理工艺,可以显著改善 TiAl 合金的显微组织和性能,使其更好地满足航空航天等领域的应用需求。热处理是增材制造 TiAl 合金不可或缺的后处理步骤,对提升性能具有重要意义。

增材制造 TiAl 合金中仍有细小孔隙等缺陷,会影响材料致密度和力学性能稳定性,可以通过高温高压热处理降低缺陷含量,提高致密化及显微组织均匀性,一般采用热等静压处理(HIP)^[48,54,55]。KIM 等^[56]的研究表明通过热等静压处理可以提高 TiAl 合金的致密度至 99.8% 以上。SEIFI 等^[48]研究了 HIP 对 EBM 增材制造 Ti-48Al-2Cr-2Nb 的显微组织异质性、缺陷分布和力学性能的影响,发现热等静压减少了打印态内部缺陷(见图 4),但 α_2 和 γ 晶粒出现粗化。

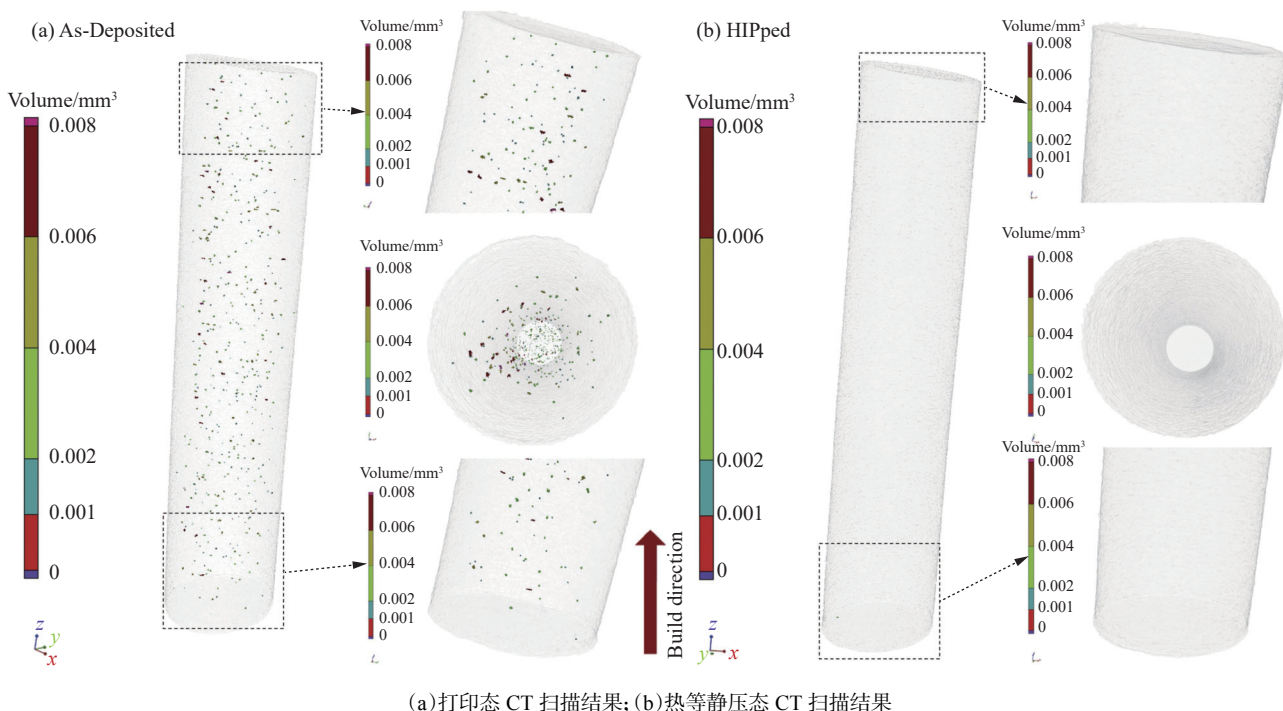


图 4 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金打印态和热等静压后的内部缺陷变化^[48]
Fig. 4 Changes in internal defects of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy in as-deposited and HIP^[48]

可见,热等静压在愈合缺陷的同时也会改变 TiAl 合金的显微组织。MOHAMMAD 等^[57]对 EBM 制备的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金在 100 MPa 的氩气环境中,在 1 200 °C、4 h 条件下进行了 HIP,在初始打印态和 HIP 态下(图 5),合金的显微组织均以片层为主,HIP 样品片层宽度及晶粒尺寸显著增大。HIP 处理大幅提升大角度晶界(HAGB)比例,位错被湮灭/吸收,导致 HIP 样品中无位错区的比例增大。YANG 等^[54]通过研究 HIP 对 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金显微组织的影响,发现 HIP 后晶粒大小和相含量均发生了改变,HIP 能提高 γ 相含量,有利于提高塑性。同样,CAKMAK 等^[58]的研究也表明 HIP 后获得了良好的拉伸性能,具有良好的塑性和出色的高温强度保持性。LIN 等^[59]的研究发现 HIP 后的 EBM Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金仍显示出粗晶

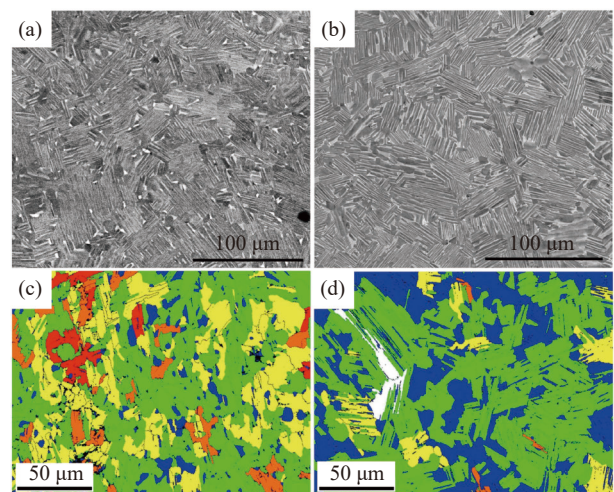
粒和细晶粒交替的显微组织。这说明热等静压可能还不足以实现显微组织的均匀化,须在打印过程中保证显微组织的均匀性。在一些文献中只进行了单步 HIP 作为后热处理;但在某些情况下,将 HIP 和随后的 HT 结合起来是提高增材制造 TiAl 合金性能的重要途径之一。虽然增材制造 TiAl 合金在热等静压后缺陷减少,但热等静压后的双态组织强度及蠕变等性能较差,因此还需通过高温热处理进一步调整显微组织以满足使用需求。

电子束选区熔化增材制造 TiAl 合金的显微组织通常为双态或近 γ 组织,因此需要通过热处理进一步调控显微组织以更好满足应用需求。热处理温度、保温时间、冷却速度是 TiAl 合金热处理工艺的关键参数。热处理温度会对合金元素的扩散及相变产生重要影响^[60],应控制热处理温度和保温时间

以避免组织粗大, 恶化力学性能。TiAl 合金的热处理制度需基于其 α 相变点(T_α)和共析转变点(T_c)进行设计, Al 含量对 TiAl 合金的相变点影响显著。WARTBICHLER 等^[46]发现增加能量输入会导致蒸发造成的 Al 损失增加, 进而导致 TiAl 合金的 T_α 由 1 367 °C 降至 1 342 °C, 这意味着在研究增材制造 TiAl 合金的热处理时, 必须考虑工艺参数, 关注整体化学成分和相变点变化, 灵活制定热处理工艺。此外, 带状组织对热处理的反应是不均匀的, WARTBICHLER 等^[46]也提出了一种均质化热处理路线。尽管如此, 也应在打印过程中尽量减少带状组织, 保证显微组织的均匀性。VILARO 等^[61]对激光增材制造 Ti-47Al-2Cr-2Nb 合金在 1 250 °C 下退火 4 h, 然后在 900 °C 下保温 4 h 获得了由片层 $\alpha_2+\gamma$ 晶粒和 γ 晶粒组成的双态组织。YUE 等^[62]将 TiAl 合金样品在 1 380 °C 下退火处理 1 h, 空冷后获得了全片层组织, 但其片层团尺寸已达 215 μm , 这对于 TiAl 合金的室温塑性是不利的。同样, HERNANDEZ 等^[63]对不同保温温度对 EBM TiAl 合金组织的影响进行了研究, 发现在 1 380 °C 保温 1 h 后炉冷, 其显微组织为平均片层团尺寸 550 μm 的全片层。因此, 增材制造 TiAl 合金在单相区进行热处理时应严格控制保温时间及冷却方式, 避免晶粒尺寸过大, 从而恶化力学性能。在 BIAMINO 等^[36]研究中, 通过对 HIP 后的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金在 1 320 °C 下保温 2 h 热处理得到了理想双态组织。而 KIM 等^[64]将 EBM 制备的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金在 1 360 °C 下热处理 2 h, 然后风冷至 950 °C, 并在 950 °C 下保持 4 h, 随后将其炉冷却至 750 °C 后空冷至室温, 得到具有近片层组织, 具有薄的片层结构和细小的等轴 γ 晶粒, 如图 6 所示。YUE 等^[65]通过在 1 370 °C 下退火 2 h 后再在 $\alpha+\beta+\gamma$ 和 α 相区之间进行循环热处理, 削弱了不同加工参数制备的两个样品的织构强度和拉伸性能的各向异性。YANG 等^[66]则针对增材制造 TiAl 合金的显微组织调控, 设计了多级热处理方案: 首先在 1 250 °C 保温 10 min 进行油淬, 随后在 1 200 °C 保温 2 h 空冷, 得到了细小均匀的片层组织。综上所述, EBM 制备的 TiAl 合金在热处理时必须考虑具体成分、工艺参数、原始组织、目标组织等灵活制定热处理工艺, 且需避免热处理造成的晶粒异常长大。

除了典型的 4822 基合金, 电子束选区熔化增材制造 TNM 及高 Nb-TiAl 等其他成分的 TiAl 合金热处理工艺也被广泛关注。NARAYANA 等^[67]通过将 EBM TNM-B1 合金在 1 400 °C 保温 15 min

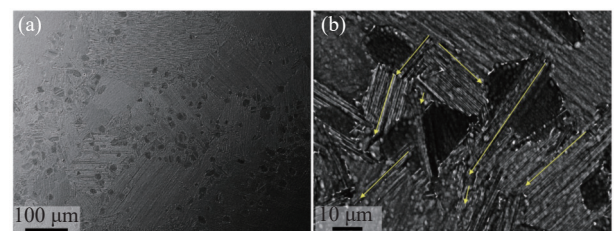
后空冷, 随后在 850 °C 保温 6 h 后炉冷, 获得了具有超细片层间距(20 ~ 40 nm)的 α_2/γ 片层团(<50 μm), 如图 7 所示, 在 800 °C 下具有高强度(770 MPa)和良好的塑性(6%)。TERNER 等^[68]对 EBM 制备高钕 TiAl 合金的可行性及后处理进行研究, 发现在 HIP 后建立不同的热处理(HTs)可以获得不同的显微组织, 在较低温度(1 295 °C)下可以获得双态组织; 在较高温度(1 315 °C)下可以获得较粗的全片层组织, 晶粒尺寸范围为 200 ~ 500 μm 。此外, TiAl 合金成分差异、热处理温度、保温时间、冷却方式等都会对其热处理后显微组织产生重要影响, 尤其是不同成分的 TiAl 合金热处理工艺差别大, 需更深入的研究。可见, 增材制造 TiAl 合金的热处理工艺目前仍需开发完善, 而简便高效的热处理对于工业生产是极为有利的, 这也对增材制造 TiAl 合金的热处理工艺提出了新的要求和挑战。



(a)打印态显微组织; (b)HIP 态显微组织; (c)打印态位错分布; (d)HIP 态位错分布(蓝色区域为无位错)^[57]

图 5 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金打印态和热等静压态的显微组织及位错分布

Fig. 5 Microstructures and dislocation distributions of the as-deposited and HIPed Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy^[57]



(a)低倍显微组织; (b)高倍显微组织

图 6 两步热处理后 Ti-48Al-2Cr-2Nb 的显微组织^[64]

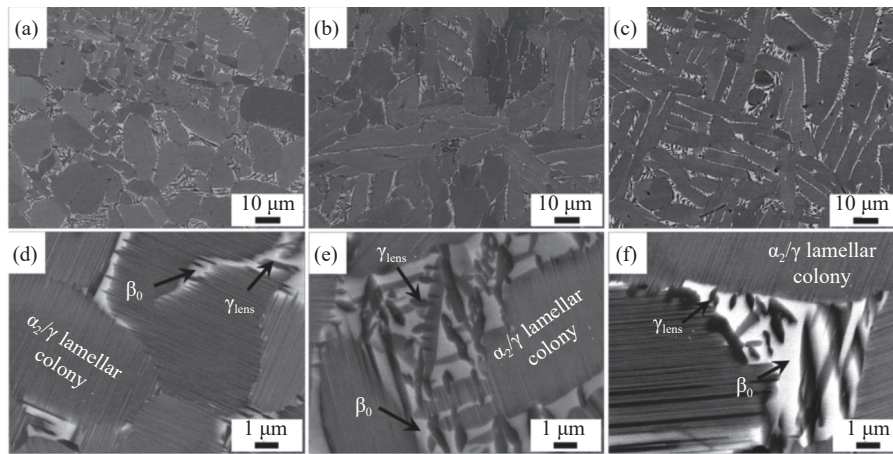
Fig. 6 Microstructure of Ti-48Al-2Cr-2Nb after two-step heat treatment^[64]

2.2 力学性能

TiAl 合金有以下四种典型组织: 全片层

(FL)、近片层(NL)、双态(DP)、近 γ (NG), TiAl合金的力学性能取决于合金成分和显微组织^[69]。BIAMINO等^[36]研究了EBM和热处理后TiAl合金的显微组织、残留孔隙率和化学成分,热等静压处理提高了合金的致密度,而热处理后的双态组织晶粒几乎没有长大,室温抗拉强度为469 MPa,延伸率为1.1%。FENG等^[70]通过EBM优化工艺制备了Ti-48Al-2Cr-2Nb合金,室温下打

印态的最大抗拉强度为695.29 MPa,但其延伸率较低,且数据分散性较大;650 °C时抗拉强度为707 MPa,延伸率超过3.5%。表1总结了增材制造TiAl合金的室温及高温拉伸性能。从表中可以看出增材制造TiAl合金的室温塑性较差,延伸率小于1%,强度高于传统铸造4822合金。通过热等静压和热处理能进一步改善增材制造TiAl合金的力学性能。



(a)(d) 1240 °C-1 h+850 °C/6 h; (b)(e)1400 °C-15 min+850 °C/6 h; (c)(f) 1400 °C-15 min+ 1210 °C-1 h+850 °C/6 h

图7 退火+稳定化热处理后TNM-B1合金的显微组织^[67]

Fig. 7 Microstructure of TNM-B1 alloy after annealing and stabilization heat treatment^[67]

表1 增材制造TiAl合金的室温及高温拉伸性能

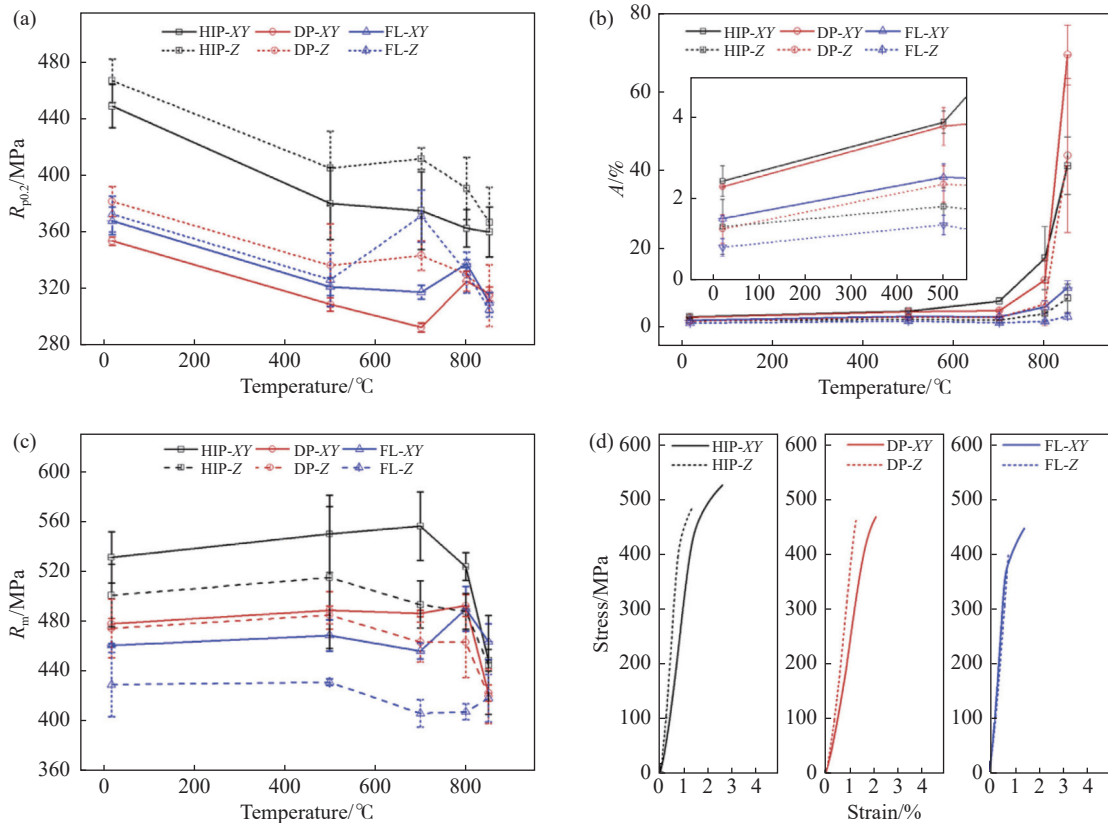
Table 1 Room temperature and high-temperature tensile properties of additive manufactured TiAl alloys

Alloy	State	Temperature/°C	UTS/MPa	YS/MPa	EL/%	Refs
4722	EBM	RT	534 ~ 572		0.67 ~ 0.98	[65]
	EBM+HT	RT	552 ~ 598		0.73 ~ 1.04	
4722	EBM	RT	462 ~ 568	462 ~ 530	0.27 ~ 0.98	[41]
	EBM+HIP	RT	434	374	1.15	
4822	EBM+HIP+HT	RT	469	353	1.10	[36]
	EBM	RT	603±18	555±11	0.94±0.06	
4822	EBM+HIP+HT	RT	429±26	372±13	0.8±0.2	[59]
	EBM	RT	695.29			
4822	EBM	650	700±10		4.28	[70]
	EBM	700	512.3±7.3	487.7±3.3	1.31±0.24	
4822	EBM+HIP+HT	RT	474±23	382±11	1.3±0.3	[73]
	EBM+HIP+HT	800	460		2	
458	EBM	RT	450 ~ 500			[74]
	EBM+HIP	RT	600 ~ 800			
TNM-B1	EBM+HT	800	770	715	6	[67]

Note: 4722 refers to Ti-47Al-2Cr-2Nb; 4822 refers to Ti-48Al-2Cr-2Nb; 458 refers to Ti-45Al-8Nb; TNM-B1 refers to Ti-43.5Al-4Nb-1Mo-0.1B; UTS denotes the ultimate tensile strength; YS denotes the yield strength; EL denotes the elongation.

增材制造 TiAl 合金可能存在明显的各向异性。LIN 等^[59]研究了 HIP 和热处理态 Ti-48Al-2Cr-2Nb 试样的各向异性(见图 8), 室温下 HIP 态试样在 Z 方向的屈服强度高于 X、Y 方向试样; 而经过热处理的全片层组织试样在 X、Y 和 Z 方向上的差异相对较小。当温度升高至 700 °C 时, HIP 和热处理后的合金屈服强度均呈现出明显的各向异性, 然而, 当温度继续升高至 850 °C 时, 由于高温下更多的滑移系被激活, HIP 态试样的各

向异性有所减弱。无论室温还是高温条件下, HIP 和热处理态试样在 Z 方向的延伸率均低于 X、Y 方向, 表现出明显的各向异性, 这主要归因于裂纹扩展路径的差异以及片层组织的择优取向。TiAl 合金力学性能的各向异性不能通过热处理消除。CHEN 等^[75]研究发现束流为 5.5 mA 时, 提高扫速至 2 100 mm/s, 制备的样品表现出较弱的各向异性。这也说明在 EBM 过程中可以通过控制工艺参数降低各向异性。



(a)屈服强度与温度的关系; (b)伸长率与温度的关系; (c)极限强度与温度的关系; (d)室温应力-应变曲线

图 8 热处理 EBM TiAl-4822 的拉伸性能^[59]
Fig. 8 Tensile properties of heat-treated EBM TiAl-4822^[59]

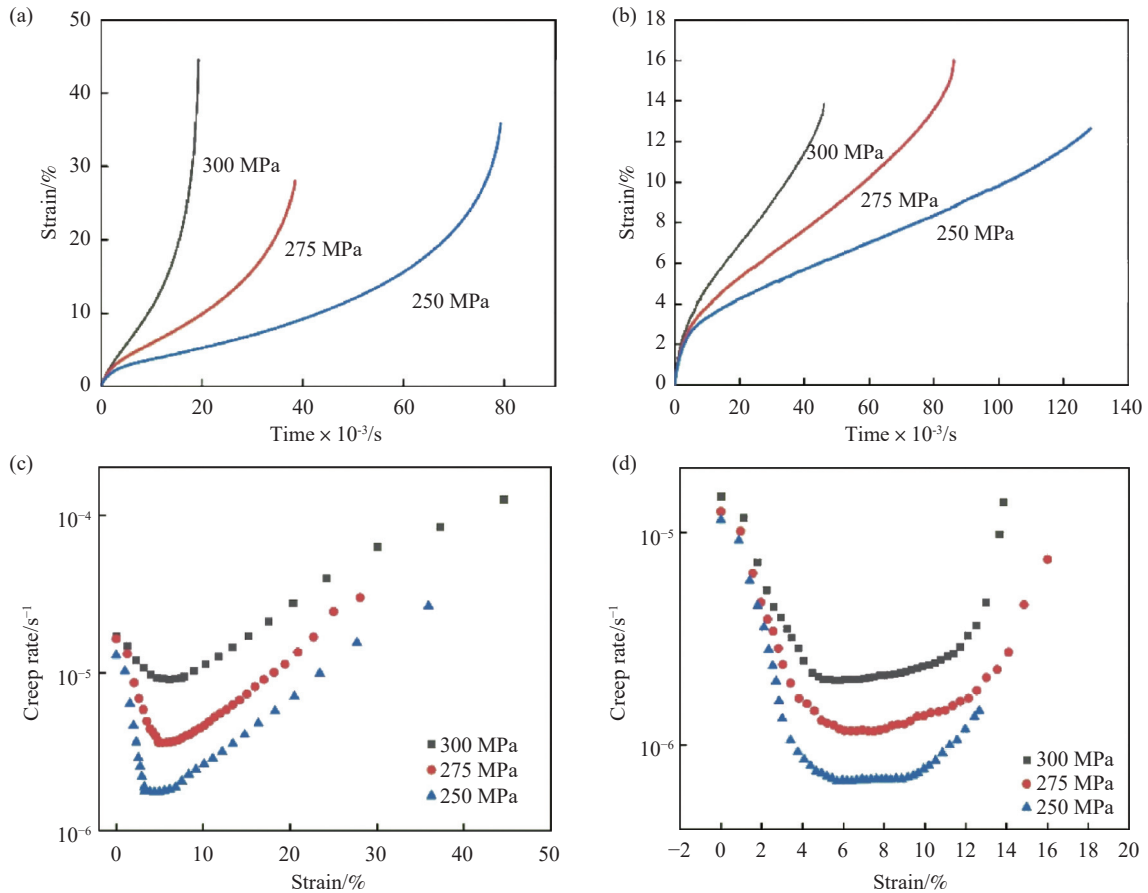
TiAl 合金作为一种轻质高温结构材料, 其复杂的高温服役环境使得蠕变和疲劳性能也至关重要。BAUDANA 等^[44]研究了 EBM Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si 合金的蠕变性能, 热处理至近片层组织后, 其蠕变性能提高, 但其室温力学性能较差, 延伸率仅 0.27%±0.1%。KIM 等^[64]针对 EBM Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金不适合蠕变的近 γ 组织, 通过两步热处理获得了具有细小的等轴 γ 晶粒的近片层组织, 提高了高温 (750 °C) 抗蠕变性, 并保持了室温塑性。YUE 等^[62]探讨了热处理对 EBM 制备的 Ti-48Al-

2Cr-2Nb 合金的显微组织和蠕变行为的影响, 通过热处理获得了全片层组织, 在 800 °C, 250、275 MPa 和 300 MPa 的应力下, 热处理后 TiAl 合金的蠕变断裂寿命分别是打印态 TiAl 合金的 1.6、2.2 倍和 2.4 倍, 改善了蠕变性能(见图 9)。提高片层含量有利于提高 TiAl 合金的蠕变性能, 但也应避免片层团的异常长大, 否则会恶化 TiAl 合金的室温塑性。JUECHTER 等^[76]指出, 与全片层热处理和铸造 TiAl 合金相比, 增材制造 TiAl 合金显示出更高的蠕变速率, 这是因为近 γ 组织的蠕变强度较低, 但

塑性较好。因此,如何平衡增材制造 TiAl 合金的室温塑性和蠕变性能至关重要,同时也是亟待解决的难题。

CHO 等^[45]探讨了带状组织对 EBM 制备 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金疲劳行为各向异性的影响,研究发现,室温下 45°打印(倾斜打印)试样的疲劳强度高于 0°打印(垂直打印)试样,并且其强度与经过 HIP 处理的铸态合金强度接近;而在 750 °C 时,0°打印和 45°打印试样疲劳性能接近。同时,缺陷及表

面粗糙度等因素对增材制造 TiAl 合金的疲劳寿命影响巨大,缺陷位置易引起应力集中,造成裂纹的萌生与扩展。FILIPPINI 等^[77]研究了通过电火花加工引入人工缺陷的 EBM Ti-48Al-2Cr-2Nb 的疲劳行为。LIN 等^[78]研究发现在相同应力幅值下,带有缺陷的 EBM Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的疲劳寿命的变化可达到 3 个数量级。因此,增材制造 TiAl 合金应尽可能避免缺陷,如通过热等静压处理愈合缺陷等方法提高 TiAl 合金疲劳性能。



应变-时间曲线: (a)打印态 4822, (b)热处理态 4822; 速率-应变曲线: (c)打印态 4822, (d)热处理态 4822

图 9 打印态和热处理态 4822 合金在 800 °C 下的蠕变结果^[62]

Fig. 9 Creep results of the as-printed and heat-treated 4822 alloy at 800 °C^[62]

3 总结和展望

EBM 工艺参数的优化是获得较优显微组织、高致密度和最小残余应力 TiAl 合金的重要步骤。此外, HIP 或 HT 等后处理技术可以有效地降低孔隙率,调控显微组织。研究表明, HIP 和 HT 都是增材制造的 TiAl 合金提升性能的重要途径,这些后处理技术有助于消除缺陷并提高性能。EBM 制备的

4822 合金在 650 °C 时的抗拉强度可达 700 MPa,室温塑性较差,而经过 HIP 和 HT 处理后室温塑性可提高至 1.3%。因此,优化的增材制造工艺参数和后处理相结合,对于提高 EBM 制备 TiAl 合金的成形质量和性能具有巨大的潜力。总之,前述研究证明了 EBM 在调整 TiAl 合金的显微组织以获得所需力学性能方面具有巨大潜力。尽管研究人员对 EBM 增材制造 TiAl 合金的成形工艺参数及热处理

工艺进行了大量研究,也取得了重要进步和突破,但仍需要进一步的研究来全面了解潜在的机制,并优化显微组织,以实现 EBM 制备 TiAl 合金的理想性能。因此距离大规模工程应用仍有如下问题需要探讨和解决。

1) 适于增材制造的 TiAl 合金成分设计与工艺优化。目前,大多数研究都是基于经典铸造 4822 合金等成分,因此需要结合 EBM 微熔池冶金、快速冷却、Al 损失及组织退化等工艺特点及问题,开发适用于 EBM 的新成分 TiAl 合金,并开发多尺度建模方法,优化能量输入与显微组织的关系,提高 EBM 制备 TiAl 合金的综合力学性能及部件质量。此外,EBM 制备 TiAl 合金的工艺仍需创新和完善,如何获得致密且细小均匀的显微组织,提高表面质量,保证工艺可重复性,同一部件不同部位、不同炉次间性能的一致性也是重要的研究方向。此外,

应充分发挥 EBM 制备复杂结构 TiAl 合金零件,例如点阵结构、拓扑优化结构等的优势,拓展其应用范围。

2) 增材制造的 TiAl 合金的热处理工艺还需完善。热等静压可以愈合内部缺陷,热处理可以进一步根据所需性能优化显微组织,但要避免晶粒尺寸异常长大,平衡好 TiAl 合金各项性能之间的关系。如何通过热处理解决 EBM 制备 TiAl 合金显微组织的不均匀现象仍具有挑战性。

3) EBM 增材制造 TiAl 合金蠕变和疲劳等力学性能的研究还不够全面,建立 EBM 增材制造 TiAl 合金性能的系统全面评价对于推进 TiAl 合金的工程应用至关重要。结合机器学习等新技术,建立 EBM TiAl 合金成形工艺-显微组织-力学性能数据库,为工艺优化和性能预测提供数据支撑,这也是未来 TiAl 合金相关领域研究者共同努力的方向。

参考文献

- [1] LIU C T, SCHNEIBEL J H, MAZIASZ P J, *et al.* Tensile properties and fracture toughness of TiAl alloys with controlled microstructures[J]. *Intermetallics*, 1996, 4(6): 429-440.
- [2] APPEL F, OEHRING M, WAGNER R. Novel design concepts for gamma-base titanium aluminide alloys[J]. *Intermetallics*, 2000, 8(9-11): 1283-1312.
- [3] KIM S W, HONG J K, NA Y S, *et al.* Development of TiAl alloys with excellent mechanical properties and oxidation resistance[J]. *Materials & Design (1980-2015)*, 2014, 54: 814-819.
- [4] KAN W B, LIN J P. Research progress in the preparation of titanium-aluminum alloys by additive manufacturing technology[J]. *Materials China*, 2015, 34(2): 111-119,135.
(阚文斌,林均品. 增材制造技术制备钛铝合金的研究进展[J]. *中国材料进展*, 2015, 34(2): 111-119,135.)
- [5] KIM Y W, KIM S L. Advances in gammalloy materials—processes—application technology: successes, dilemmas, and future[J]. *JOM*, 2018, 70(4): 553-560.
- [6] KIM Y W. Intermetallic alloys based on gamma titanium aluminide[J]. *Journal of Metals*, 1989, 41: 24-30.
- [7] KIM Y W, DIMIDUK D M. Progress in the understanding of gamma titanium aluminides[J]. *JOM*, 1991, 43(8): 40-47.
- [8] DING J, ZHANG M H, YE T, *et al.* Microstructure stability and micro-mechanical behavior of as-cast gamma-TiAl alloy during high-temperature low cycle fatigue[J]. *Acta Materialia*, 2018, 145: 504-515.
- [9] COX S C, THORNBY J A, GIBBONS G J, *et al.* 3D printing of porous hydroxyapatite scaffolds intended for use in bone tissue engineering applications[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2015, 47: 237-247.
- [10] TOFAIL S A M, KOUMOULOS E P, BANDYOPADHYAY A, *et al.* Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities[J]. *Materials Today*, 2018, 21(1): 22-37.
- [11] SHARMAN A R C, HUGHES J I, RIDGWAY K. Characterisation of titanium aluminide components manufactured by laser metal deposition[J]. *Intermetallics*, 2018, 93: 89-92.
- [12] KARIMI P, KESHAVARZ M K, SADEGHI E, *et al.* Interplay of process, microstructure, and mechanical performance in electron beam-powder bed fusion of Ti48Al2Nb2Cr[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 77: 103811.
- [13] EMIRALIOĞLU A, ÜNAL R. Additive manufacturing of gamma titanium aluminide alloys: A review[J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57(7): 4441-4466.
- [14] LIU Z D, ZHANG H Y, ZHOU G, *et al.* Low-cycle fatigue behavior of metastable β titanium alloy Ti-6Mo-5V-3Al-2Fe-2Zr under two different heat treatment processes[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(2): 658-666.

- (刘知多, 张浩宇, 周舸, 等. 两种不同热处理工艺下亚稳 β 钛合金 Ti-6Mo-5V-3Al-2Fe-2Zr 的低周疲劳行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(2): 658-666.)
- [15] WANG H C, CHENG J, GAI J Y, *et al.* Effects of pre-aging heat treatment on microstructural evolution and mechanical properties of novel near- β biomedical Ti-10Mo-6Zr-4Sn-3Nb alloy[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(2): 17-23.
(王鸿川, 程军, 盖晋阳, 等. 预时效热处理对新型近 β 医用 Ti-10Mo-6Zr-4Sn-3Nb 合金组织演变和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2024, 53(2): 17-23.)
- [16] ZHANG X Y, WANG S Y, LIU H, *et al.* Microstructure evolution and mechanical properties of additively manufactured Ni-based GH4099 superalloy via hot isostatic pressing and heat treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 903: 146696.
- [17] CHENG J. Effects of deformation amount on microstructure and mechanical properties of (CoNiV)₉₇Al₃ medium-entropy alloy[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2024, 45(3): 1-8.
(程军. 变形量对 (CoNiV)₉₇Al₃ 中熵合金组织和力学性能的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2024, 45(3): 1-8.)
- [18] ZHENG G, TANG B, ZHAO S, *et al.* Breaking the high-temperature strength-ductility trade-off in TiAl alloys through microstructural optimization[J]. International Journal of Plasticity, 2023, 170: 103756.
- [19] CAO J, GUO Z C, SUN T L, *et al.* Microstructure evolution and mechanical properties of a high Nb-TiAl alloy via HIP and heat treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 884: 145517.
- [20] LI M, WU X, YANG Y, *et al.* TiAl/RGO (reduced graphene oxide) bulk composites with refined microstructure and enhanced nanohardness fabricated by selective laser melting (SLM)[J]. Materials Characterization, 2018, 143: 197-205.
- [21] MENG G, JI B, HAN H, *et al.* Design and simulation of an innovative cylinder fabricated by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(1): 133-142.
- [22] SHI G, GUAN C, QUAN D, *et al.* An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(4): 1252-1259.
- [23] CAPRIO L, DEMIR A G, CHIARI G, *et al.* Defect-free laser powder bed fusion of Ti-48Al-2Cr-2Nb with a high temperature inductive preheating system[J]. Journal of Physics: Photonics, 2020, 2(2): 024001.
- [24] LEE S, KIM J, CHOE J, *et al.* Understanding crack formation mechanisms of Ti-48Al-2Cr-2Nb single tracks during laser powder bed fusion[J]. Metals and Materials International, 2021, 27(1): 78-91.
- [25] BAI P, HUO P, ZHAO Z, *et al.* Microstructure evolution and corrosion mechanism of in situ synthesized TiC/TC4 alloy nanocomposites fabricated by laser powder bed fusion[J]. Ceramics International, 2023, 49(2): 2752-2764.
- [26] MACORETTA G, BERTINI L, MONELLI B D, *et al.* Productivity-oriented SLM process parameters effect on the fatigue strength of inconel 718[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 168: 107384.
- [27] WANG M L, YANG X G, LI B, *et al.* The dominant role of defects on fatigue behaviour of a SLM Ni-based superalloy at elevated temperature[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 176: 107894.
- [28] GUSSONE J, HAGEDORN Y C, GHEREKHLOO H, *et al.* Microstructure of γ -titanium aluminide processed by selective laser melting at elevated temperatures[J]. Intermetallics, 2015, 66: 133-140.
- [29] LI W, LIU J, ZHOU Y, *et al.* Effect of substrate preheating on the texture, phase and nanohardness of a Ti-45Al-2Cr-5Nb alloy processed by selective laser melting[J]. Scripta Materialia, 2016, 118: 13-18.
- [30] POLOZOV I, KANTYUKOV A, POPOVICH A, *et al.* Tailoring microstructure of selective laser melted TiAl-alloy with in-situ heat treatment via multiple laser exposure[C]//The Minerals, Metals & Materials Society. TMS 2021 150th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. Cham: Springer International Publishing, 2021: 197-204.
- [31] LI K A, WAN J, TANG B, *et al.* Research progress of selective laser melting titanium aluminide alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(12): 3526-3538.
(李康安, 万杰, 唐斌, 等. 选区激光熔化制备钛铝合金研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(12): 3526-3538.)
- [32] LIU Z, WANG W, MA R, *et al.* Microstructure and properties of γ -TiAl alloy fabricated by laser melting deposition[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(6): 1925-1930.
- [33] THOMAS M. Progress in the understanding of the microstructure evolution of direct laser fabricated TiAl[J]. Materials Science Forum, 2016, 879: 1939-1944.
- [34] HUANG D, TAN Q, ZHOU Y, *et al.* The significant impact of grain refiner on γ -TiAl intermetallic fabricated by laser-based additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2021, 46: 102172.
- [35] XUE H, LIANG Y F, PENG H, *et al.* Additive manufacturing of micro/nano multiphase synergistically reinforced Ti-55Al-

- 7.5Nb with a reticular boundary precipitate via direct laser deposition[J]. Additive Manufacturing, 2022, 58: 102989.
- [36] BIAMINO S, PENNA A, ACKELID U, *et al.* Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation[J]. Intermetallics, 2011, 19(6): 776-781.
- [37] KÖRNER C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review[J]. International Materials Reviews, 2016, 61(5): 361-377.
- [38] CORMIER D, HARRYSSON O, MAHALE T, *et al.* Freeform fabrication of titanium aluminide via electron beam melting using prealloyed and blended powders[J]. Research Letters in Materials Science, 2007, 2007: 1-4.
- [39] ZHOU J, LI H, YU Y, *et al.* Research on aluminum component change and phase transformation of TiAl-based alloy in electron beam selective melting process under multiple scan[J]. Intermetallics, 2019, 113: 106575.
- [40] MURR L E, GAYTAN S M, CEYLAN A, *et al.* Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting[J]. Acta Materialia, 2010, 58(5): 1887-1894.
- [41] YUE H Y, CHEN Y Y, WANG X B, *et al.* Microstructure, texture and tensile properties of Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy produced by selective electron beam melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 766: 450-459.
- [42] MOHAMMAD A, ALAHMARI A, MOHAMMED M, *et al.* Effect of energy input on microstructure and mechanical properties of titanium aluminide alloy fabricated by the additive manufacturing process of electron beam melting[J]. Materials, 2017, 10(2): 211.
- [43] KLASSEN A, FORSTER V E, JUECHTER V, *et al.* Numerical simulation of multi-component evaporation during selective electron beam melting of TiAl[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 247: 280-288.
- [44] BAUDANA G, BIAMINO S, KLÖDEN B, *et al.* Electron beam melting of Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si: Feasibility investigation[J]. Intermetallics, 2016, 73: 43-49.
- [45] CHO K, KOBAYASHI R, OH J Y, *et al.* Influence of unique layered microstructure on fatigue properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys fabricated by electron beam melting[J]. Intermetallics, 2018, 95: 1-10.
- [46] WARTBICHLER R, CLEMENS H, MAYER S, *et al.* On the formation mechanism of banded microstructures in electron beam melted Ti-48Al-2Cr-2Nb and the design of heat treatments as remedial action[J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(12): 2101199.
- [47] TODAI M, NAKANO T, LIU T, *et al.* Effect of building direction on the microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting[J]. Additive Manufacturing, 2017, 13: 61-70.
- [48] SEIFI M, SALEM A A, SATKO D P, *et al.* Effects of HIP on microstructural heterogeneity, defect distribution and mechanical properties of additively manufactured EBM Ti-48Al-2Cr-2Nb[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 729: 1118-1135.
- [49] WARTBICHLER R, CLEMENS H, MAYER S. Electron beam melting of a β - solidifying intermetallic titanium aluminide alloy[J]. Advanced Engineering Materials, 2019, 21(12): 1900800.
- [50] GHIBAUDO C, WARTBICHLER R, MARCHESE G, *et al.* Influence of focus offset on the microstructure of an intermetallic γ -TiAl based alloy produced by electron beam powder bed fusion[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 89: 132-141.
- [51] CHEN Y Y, YUE H Y, WANG X B, *et al.* Selective electron beam melting of TiAl alloy: Microstructure evolution, phase transformation and microhardness[J]. Materials Characterization, 2018, 142: 584-592.
- [52] SCHWERDTFEGER J, KÖRNER C. Selective electron beam melting of Ti-48Al-2Nb-2Cr: Microstructure and aluminium loss[J]. Intermetallics, 2014, 49: 29-35.
- [53] GALATI M, RIZZA G, SALMI A, *et al.* Residual stress investigation on Ti-48Al-2Cr-2Nb samples produced by electron beam melting process[J]. Procedia CIRP, 2021, 99: 336-341.
- [54] YANG X, ZHAO Z, BAI P, *et al.* EBSD investigation on the microstructure of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy hot isostatic pressing formed by selective laser melting (SLM)[J]. Materials Letters, 2022, 309: 131334.
- [55] PETERS S, PEREZ M, BLACKWELL P. Integrating HIP and homogenisation heat treatment and its effect on the workability of a conventional peritectic TiAl alloy[J]. Intermetallics, 2023, 158: 107884.
- [56] KIM Y K, YOUN S J, KIM S W, *et al.* High-temperature creep behavior of gamma Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 763: 138138.
- [57] MOHAMMAD A, AL-AHMARI A M, BALLA V K, *et al.* In vitro wear, corrosion and biocompatibility of electron beam melted γ -TiAl[J]. Materials & Design, 2017, 133: 186-194.

- [58] CAKMAK E, NANDWANA P, SHIN D, *et al.* A comprehensive study on the fabrication and characterization of Ti-48Al-2Cr-2Nb preforms manufactured using electron beam melting[J]. *Materialia*, 2019, 6: 100284.
- [59] LIN B, CHEN W, YANG Y, *et al.* Anisotropy of microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb fabricated by electron beam melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 830: 154684.
- [60] TONG J B, WANG X D, NIE J J, *et al.* Diffusion coefficients of bcc phase and atomic mobility in Ti-Al-Fe system[J]. *Foundry Technology*, 2024, 45(7): 672-680.
(佟健博, 王向东, 聂晶晶, 等. Ti-Al-Fe 体系 bcc 相扩散系数及原子移动性[J]. *铸造技术*, 2024, 45(7): 672-680.)
- [61] VILARO T, KOTTMAN-REXERODT V, THOMAS M, *et al.* Direct fabrication of a Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy by selective laser melting and direct metal deposition processes[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 89-91: 586-591.
- [62] YUE H Y, LIANG Z Q, ZHANG F, *et al.* Effect of heat treatment on the microstructure and creep properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy produced by selective electron beam melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 859: 144224.
- [63] HERNANDEZ J, MURR L E, GAYTAN S M, *et al.* Microstructures for two-phase gamma titanium aluminide fabricated by electron beam melting[J]. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2012, 1(1): 14-27.
- [64] KIM Y K, HONG J K, LEE K A. Enhancing the creep resistance of electron beam melted gamma Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy by using two-step heat treatment[J]. *Intermetallics*, 2020, 121: 106771.
- [65] YUE H Y, PENG H, LI R F, *et al.* Effect of heat treatment on the microstructure and anisotropy of tensile properties of TiAl alloy produced via selective electron beam melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 803: 140473.
- [66] YANG G Y, JIA W P, ZHAO P, *et al.* Microstructures of as-fabricated and post heat treated Ti-47Al-2Nb-2Cr alloy produced by selective electron beam melting (SEBM)[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(7): 1683-1686.
- [67] NARAYANA P L, LI C L, KIM S W, *et al.* High strength and ductility of electron beam melted β stabilized γ -TiAl alloy at 800 °C[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 756: 41-45.
- [68] TERNER M, BIAMINO S, EPICOCO P, *et al.* Electron beam melting of high niobium containing TiAl alloy: Feasibility investigation[J]. *Steel Research International*, 2012, 83(10): 943-949.
- [69] CLEMENS H, MAYER S. Design, processing, microstructure, properties, and applications of advanced intermetallic TiAl alloys[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2013, 15(4): 191-215.
- [70] FENG J W, GUI W Y, LIU Q, *et al.* Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys prepared by electron beam selective melting additive manufacturing: Microstructural and tensile properties[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 9357-9369.
- [71] WANG J, YANG K, LIU N, *et al.* Microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb rods additively manufactured by selective electron beam melting[J]. *JOM*, 2017, 69(12): 2751-2755.
- [72] GAO R Q, PENG H, GUO H B, *et al.* An innovative way to fabricate γ -TiAl blades and their failure mechanisms under thermal shock[J]. *Scripta Materialia*, 2021, 203: 114092.
- [73] CHEN W, YANG Y, LIU L L, *et al.* Microstructure control and tensile properties of γ -TiAl produced by electron beam additive manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017(Z1): 37-41.
(陈玮, 杨洋, 刘亮亮, 等. 电子束增材制造 γ -TiAl 显微组织调控与拉伸性能研究[J]. *航空制造技术*, 2017(Z1): 37-41.)
- [74] KAN W B, LIANG Y F, PENG H, *et al.* Microstructural degradation of Ti-45Al-8Nb alloy during the fabrication process by electron beam melting[J]. *JOM*, 2017, 69(12): 2596-2601.
- [75] CHEN Y Y, YUE H Y, WANG X B. Microstructure, texture and tensile property as a function of scanning speed of Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy fabricated by selective electron beam melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 713: 195-205.
- [76] JUECHTER V, KÖRNER C. Creep properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb produced by selective electron beam melting[J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 704: 190-196.
- [77] FILIPPINI M, BERETTA S, PATRIARCA L, *et al.* Defect tolerance of a gamma titanium aluminide alloy[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 10: 3677-3682.
- [78] LIN B C, CHEN W. Mechanical properties of TiAl fabricated by electron beam melting — A review[J]. *China Foundry*, 2021, 18(4): 307-316.