

热处理对电弧增材制造 TC4 钛合金组织和性能影响的研究进展

兰中霖¹, 王玉凤², 尹来胜³, 付彬国^{1, 2}, 李国禄¹, 刘金海¹

(1. 河北工业大学材料科学与工程学院 河北省新型功能材料重点实验室, 天津 300401;
2. 天津航天机电设备研究所, 天津 300301; 3. 可为智云(天津)科技有限公司, 天津 300467)

摘要: 电弧增材制造(WAAM) TC4钛合金相比传统制造工艺具有成本低, 沉积速率高等优势, 应用前景广阔。然而电弧沉积过程会使材料微观组织结构不均匀、产生残余应力, 造成其力学性能的各向异性, 故需采用合适的热处理工艺以消除不利影响、进一步满足使用性能要求。本文综述了近年来国内外关于热处理调控电弧增材制造TC4合金组织性能方面的相关文献, 全面分析了热处理对TC4合金等轴晶形成及细化的影响机制, 讨论了热处理工艺对TC4合金强度、塑性、硬度、疲劳、抗蠕变等力学性能的影响因素与作用机理, 最后对WAAM热处理工艺对调控TC4合金组织和性能的研究进行了展望。

关键词: 电弧增材制造; TC4合金; 热处理; 微观组织; 力学性能

作者简介:

兰中霖(2001-), 男, 本科, 主要从事钛合金增材制造数值模拟方面的研究。电话: 022-60202012, E-mail: ningdelanzl@163.com

通讯作者:

付彬国, 男, 副教授, 博士生导师。电话: 022-60202012, E-mail: fubinguohao@163.com;
王玉凤, 女, 研究员。电话: 022-84478801, E-mail: wangyufeng_412@163.com

中图分类号: TG146.2;
TG166.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)09-1197-13

基金项目:

天津市技术创新引导专项基金-企业科技特派员项目(22YDTPJC00150)。

收稿日期:

2023-08-07 收到初稿,
2023-09-30 收到修订稿。

钛合金由于具有比强度高、韧性好、生物相容性和耐腐蚀性能优异等优点, 在航空航天、军事、化工和汽车等工业领域得到广泛应用^[1-3]。增材制造钛合金技术通过使用激光、电子束和电弧等热源, 将材料逐层沉积到基板上以构建零件, 能够最大限度地简化加工步骤, 减少制造成本, 为钛合金的生产制造提供了新的方法^[4-8]。其中, 电弧增材制造(Wire Arc additive manufacturing, WAAM)以电弧为热源、以丝材为原料, 材料和设备成本更低、沉积速率更高(约50~100 g/min), 适用于大中型复杂部件的生产制造^[9-11], 具有更好的工业应用化前景, 设备系统原理如图1所示^[12]。TC4(Ti-6Al-4V)是钛合金中使用最多的一种, 占商业钛合金总量的50%以上^[13]。因此近年来对TC4钛合金的电弧增材制造技术研究受到了广泛关注^[14-15]。由于电弧增材制造的加工精度较低^[16], 且较高的局部热输入等会导致形成粗大的 β 柱状晶, 使微观结构不均匀化, 产生残余应力, 并造成强度、塑性和疲劳等力学性能的各向异性, 对其应用造成不利影响^[17-20]。研究发现, 通过对增材制造后的材料采用如热处理、热等静压和轧制等后处理工艺, 能够消除应力和稳定组织, 显著提高其力学性能^[21-22]。近年来, 已有学者就不同热处理工艺对激光^[23-24]和电子束增材制造^[25-26]材料微观组织及力学性能的影响展开试验研究, 对电弧增材制造热处理过程组织性能调控的机制也在逐步深入。

电弧增材制造TC4合金的热处理工艺, 是对其微观组织进行调控并提高其力学性能的重要途径之一^[27-28], 所以系统地研究热处理条件下TC4合金的组织演化与性能改善机理具有重要的理论价值和实际意义。基于此, 本文概述了近年来有关电弧增材制造TC4合金热处理工艺的研究现状, 全面分析了其微观组织演化与调控的行为机制, 总结了热处理提升工件强度、塑性、硬度、疲劳和抗蠕变等力学性能的工艺措施, 便于材料工作者对基于热处理调控电弧增材制造TC4合金的组织 and 性能有全面研究和深入认识。

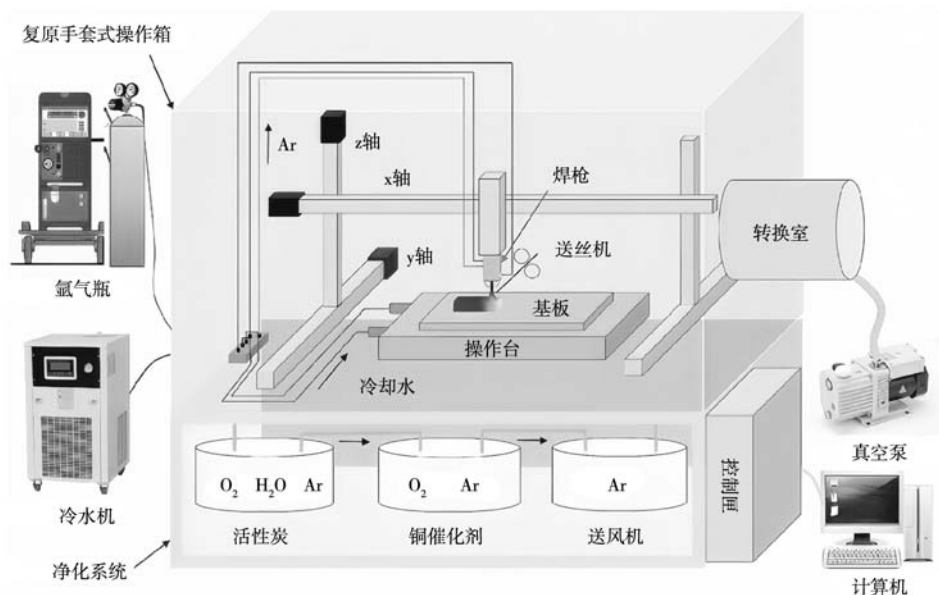


图1 电弧增材制造 (WAAM) 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of WAAM system

1 热处理对电弧增材制造TC4合金微观组织的影响

电弧增材制造的沉积过程中，材料的熔化-凝固转变和沉积层的循环再加热与固态相变会同时发生，这将使微观结构发生显著变化，并产生分级相与复杂的残余应力^[29]。TC4合金在电弧沉积过程中，由于分层沉积和重复热处理效应，形成了粗大晶粒与不均匀组织^[30]，并造成其凝固组织缺陷，形成力学性能各向异性，因此需采用适当的热处理工艺对其组织性能加以调控，以满足产品使用性能需求。本文针对TC4合金电弧增材制造的具体组织结构特征，综合梳理了热处理对电弧增材制造TC4合金组织影响方面的相关文献，并进行了系统分析。

1.1 电弧增材制造 TC4 合金的微观组织结构特征

电弧增材制造的TC4钛合金存在宏观粗大的原始 β 柱状晶组织，并根据 α 和 β 两相的尺寸和排列方式，显微组织可以描述为 β 基体中的等轴组织、 α' 马氏体、魏氏体结构和带有网篮特征的魏氏体组织，微观结构不同于其它传统制造工艺^[31-32]。其中不同组织的晶粒尺寸大小，则与增材热过程紧密相关^[31]。通过对电弧增材制造TC4合金的微观结构特征开展研究，能够为进一步调控优化其组织性能提供更全面的依据。

在电弧沉积过程中，重复热效应以及各区域样品热历史的不同，会对电弧增材微观组织带来显著影响，造成片层 α 组织的粗化。随着电弧增材的逐层堆积，沉积上层区域的同时升高了下层温度，所造成的

热循环效应相当于后续层对前一层进行了重复加热处理，进而导致 α 相晶粒粗化，使之前的凝固组织由非平衡态转变为平衡态^[12, 33-34]。Baufeld等实验研究发现，在经热处理前，由于TC4成形金属沉积（Shaped Metal Deposition, SMD）进行的多层增材堆积，使试样顶部区域一直处于 β 相区中^[32]，并以较快的冷却速度形成了精细的魏氏组织，如图2a所示^[32]；而在样品底部区域，重复加热处理在 α/β 相区中进行，使得魏氏组织较为粗大， α 稳定元素Al进一步扩散和元素偏析到 α 片层中，而 β 稳定元素V进入 β 相，造成了片层 α 组织的粗化，如图2b所示^[32]。Artaza等通过研究直接能量沉积（Direct Energy Deposition, DED）TC4退火后的显微组织发现， $\alpha + \beta$ 双相中较暗的 β 基体上分布着较亮的针状 α ，由于下层比上层经历了更多的热循环，针状 α 在沉积壁下层的尺寸比上层小^[35]。Zhou等研究也指出，电弧沉积后TC4样品顶部、中部和底部分布在 β 相基体中的片层 α 大小存在明显差异^[12]。顶部区域相对于前几层具有不完整的热历史而产生细片层状组织；中间区域的显微组织在 α/β 相区中进行了后续热处理使扩散单元分区，导致片层 α 粗化，宽度最宽；底部区域的冷却速度较快，使 α 片层以集束状粗化。

1.2 热处理对电弧增材制造 TC4 钛合金的组织调控机制

为抑制电弧增材制造TC4钛合金粗大晶粒形成，消除组织不均匀性，现阶段国内外学者主要从细化针状 α 相、实现柱状晶向等轴晶的转变，以及 α 相的晶

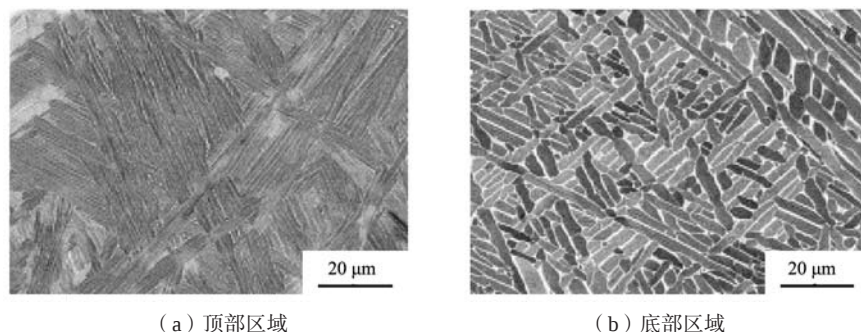


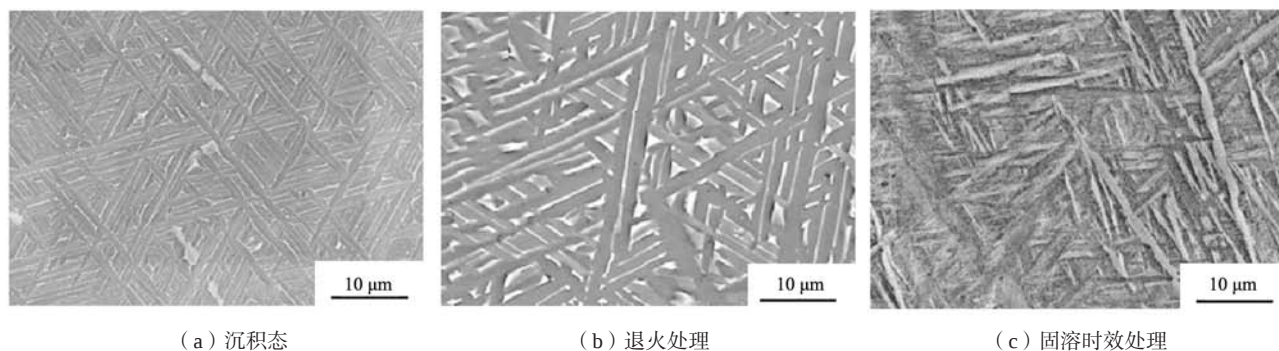
图2 未经热处理的TC4合金电弧增材制造样品顶部区域和底部区域的组织特征

Fig. 2 Microstructure characteristics of the top and bottom regions of WAAM TC4 alloy without heat treatment

界破碎机制等方面展开系统深入的研究。TC4钛合金的电弧增材制造过程会产生粗大的原始 β 晶粒，通过热处理能够改变原始 β 晶粒的形态或尺寸，并对 α 晶粒的结构尺寸产生显著影响^[36-37]。Bermingham等研究指出，相比TC4沉积态组织，退火处理促使 β 相扩散使得 α 晶粒尺寸变粗；而固溶热处理将析出更多的 β 相，然后将其淬火以保留过饱和的 β 相或产生 α' 马氏体，这些亚稳态相在随后的时效过程中分解并形成细针状 α ，其组织变化如图3所示^[36]。Gao等在其研究中，也发现了电弧沉积的TC4样品在略低于 β 转变温度热处理后，于原始 β 晶粒中形成细小的针状 α 相^[38]。Gou等分别研究了沉积态和热处理后TC4合金的微观结构，结果表明沉积态的TC4显微组织由针状 α' 马氏体和少数层状 $\alpha + \beta$ 相组成^[39]， α 晶粒中出现一定量的位错；而经900 °C/4 h保温并炉冷后，所有 α' 马氏体均转变为 $\alpha + \beta$ 相。经热处理后的工件微观组织中产生的细针状 α 相、层状 $\alpha + \beta$ 相和出现的位错缺陷等，对比原始 β 晶粒的形态和尺寸出现显著差异，这也有利于WAAM TC4合金强度的提高。

热处理组织调控的一个重要方向，是将粗大的原始晶粒转化成更为精细的等轴晶，从而使材料获得更好的力学性能^[40]。Bermingham等对电弧增材制造TC4样品进行1 050 °C/30 min保温并炉冷后的 α 组织形态

做了系统研究，指出发生在1 000 °C左右的 $\beta \rightarrow \alpha$ 转变过程冷却速度较慢导致了针状 α 相粗化，并发现了 α 集束组织厚度显著增加^[41]， α 晶界网络延伸到整个宏观结构中，且单个板条状 α 相外观变得更加等轴化。Zhou等研究发现，温度在 β 相变温度以下的热处理使得片层状 α 相厚度增加，在 $\alpha + \beta$ 相区中的热处理产生了板条状 α 相的集束组织，而温度在 β 相变温度以上则会产生带有 α 板条的精细结构^[12]。文献指出，利用相变和沉积材料的本征热处理也可以获得细小的等轴 α 晶粒^[42]，并削弱结晶组织。Chen等还对电弧增材制造TC4合金加氢并热处理的组织转变进行了系统研究，指出Ti-6Al-4V-0.48H合金在 $T_{\beta} + 10$ °C的淬火过程中所形成的粗大 α' 马氏体经 α 相的“外剪”和 β 相的“内切”机制而细化^[43]；氢的质量分数含量增加到1.38%时，再结晶 α 晶粒数量的增加促进了 α 晶粒的球化， α' 马氏体尺寸减小、体积分数降低，如图4所示^[43]，由此形成了等轴组织，在(0001)面和(1120)面上沿45°x轴的微观结构各向异性明显减弱。综上所述，通过热处理以实现晶粒结构的柱状晶到等轴晶的转变，为调控其组织性能提供了有效方法。文献还指出了一种相互依赖模型，能够有效解释和预测在电弧增材制造过程中的晶粒尺寸和组织演变规律^[44]。然而，从柱状晶到等轴晶转变对力学性能的影响机制，仍有待更深



(a) 沉积态

(b) 退火处理

(c) 固溶时效处理

图3 退火和固溶时效处理后电弧沉积TC4的组织变化

Fig. 3 Microstructure changes of arc-deposited TC4 after annealing and solution aging treatment

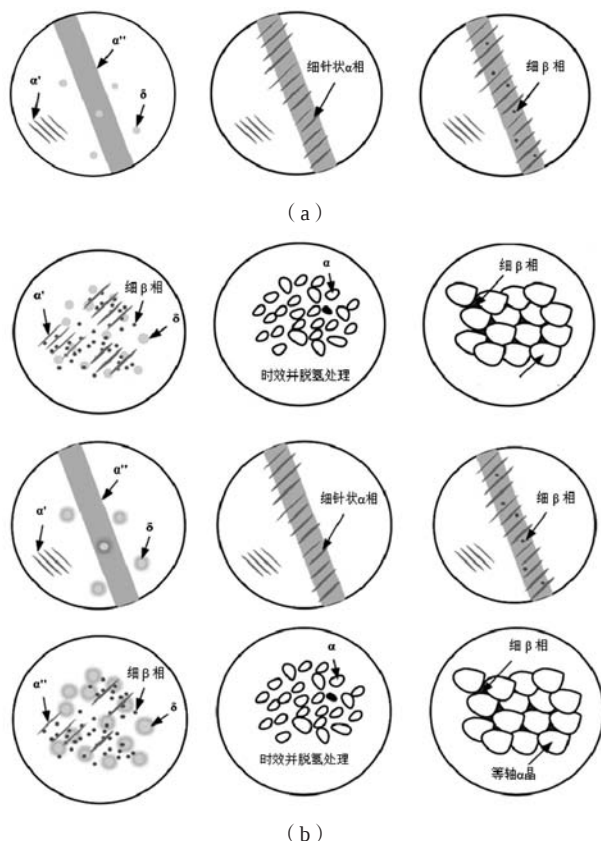


图4 HVC加氢处理Ti-6Al-4V钛合金马氏体分割及 α 相球化示意图
Fig. 4 Schematic diagram of martensite segmentation and α phase spheroidization in Ti-6Al-4V titanium alloy during HVC hydrogenation treatment

入的研究探索。

热处理过程中晶粒细化的另一重要机制是片层 α 相的晶界破碎，已有学者对其展开研究并取得一定进展。Wang等对电弧增材制造TC4合金采用了五种不同的亚转变热处理方案，研究热处理后的微观结构演变，发现经850℃/2 h热处理空冷后板条 α 相粗化^[27]；而经930℃/1 h水淬+550℃/4 h空冷后，出现细小的不连续晶界 α 、 α_p 和 α_s ；并且阐明了在固溶和时效处理

后初期， α_p 相的分解机制是依靠 β 相在沿 α/α 相内所形成边界扩散渗透，导致片层 α 相的破裂；而随热处理时间延长，晶界能降低，终止迁移的扩散传质过程成为 α_p 粗化和分解的重要机制（见图5^[27]）。Xie等也通过试验研究指出，850℃以下的热处理温度没有发生明显的显微组织变化（图6a），而经930℃/1 h固溶后空冷+550℃/4 h时效后空冷的显微组织由不连续的晶界 α 、片层 α 和细小的集束组织组成^[45]，在1 050℃空冷时效样品中，集束组织在不连续的晶界 α 处生长（图6b^[45]）。最新研究发现，900℃热处理样品在经固溶热处理和水冷时效后，样品微观组织以细片层 $\alpha + \beta$ 为特征^[39]，由重结晶的 α 片层以及由 α' 马氏体分解形成的细小集束组成；而无论是经水冷时效、空冷时效或者炉冷时效，样品均表现出重结晶的 α 片层穿过晶界 α

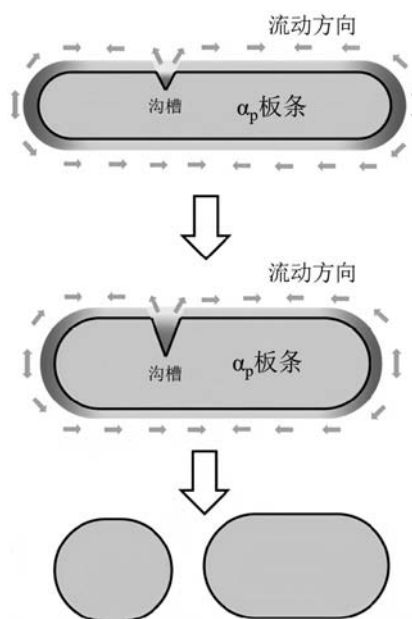
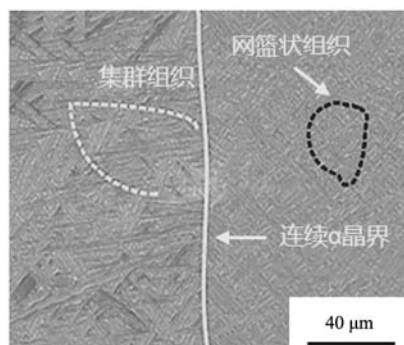
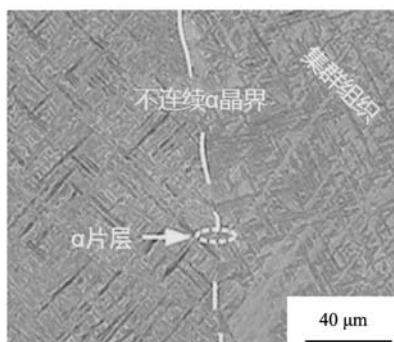


图5 热处理过程中 α_p 逐渐分解演化的示意图

Fig. 5 Schematic illustration of the progressively break-up evolution of α_p during heat treatment



(a) 550℃空冷



(b) 1 050℃空冷并时效

图6 经不同热处理工艺后电弧增材制造TC4合金的显微组织

Fig. 6 Microstructures of TC4 alloys fabricated by arc additive manufacturing after different heat treatment processes

相, 加上 α' 马氏体的分解破坏了整体连续性, 形成新的连续的晶界 α (图7^[39])。对于经1 050 °C以上的热处理样品, 在水冷时效和空冷时效下表现为针状 α 板条或集束组织穿过连续晶界以形成不连续的晶界 α , 而在炉冷时效下则是 α 片层形成连续晶界。

根据以上国内外研究表明, 如何调控热处理工艺条件以产生更多的致密细小晶粒和等轴组织, 并对晶界破碎机理作出更科学理论的阐明, 以实现组织的均匀化、精细化, 是保证电弧增材制造TC4合金获得优异的力学性能的基础。

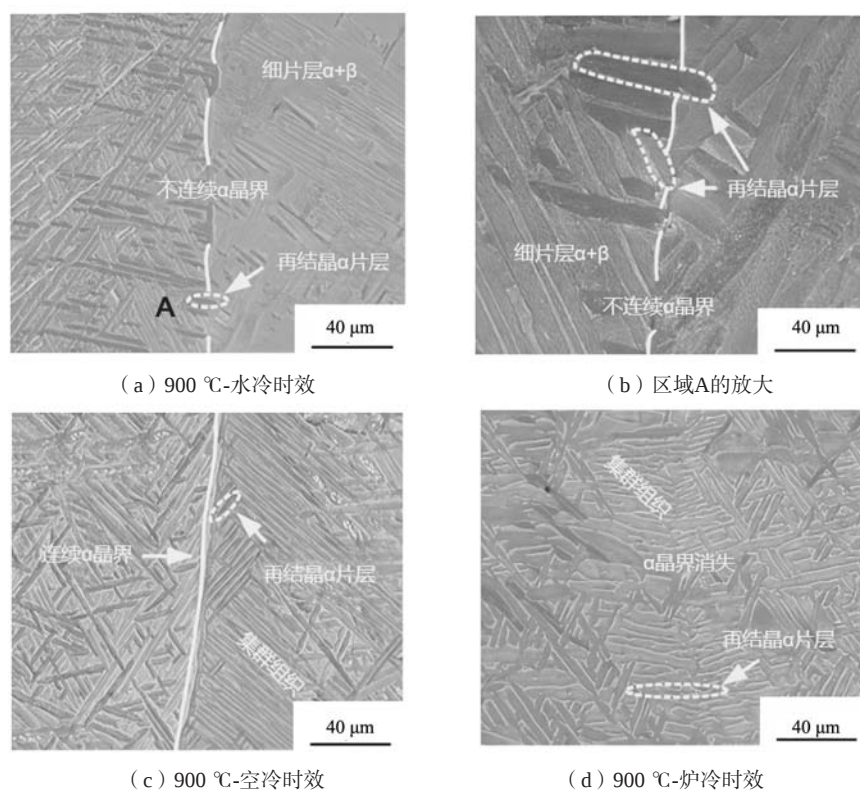


图7 不同热处理的晶界 α (α_{GB}) 附近的显微组织

Fig. 7 Microstructures near grain boundary α (α_{GB}) with different heat treatments

2 热处理对电弧增材制造TC4钛合金力学性能的影响

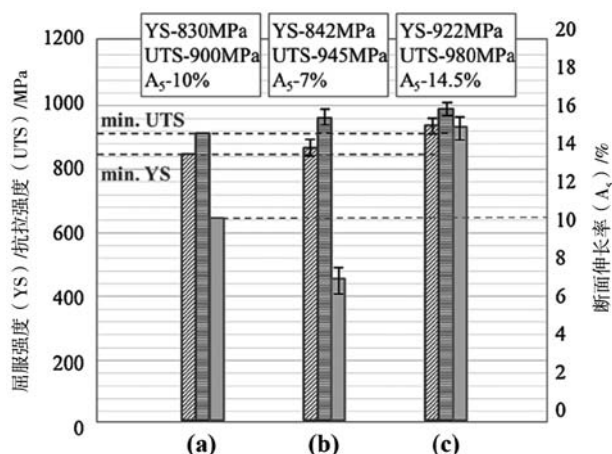
为实现材料的高性能要求, 当今对增材制造的研究不断朝“材料-结构-性能”的集成化聚焦^[29]。有研究也已明确指出增材制造TC4合金的“加工工艺-微观结构-力学性能”之间存在着相应定性和定量关系^[46]。热处理工艺通过改善材料的微观组织结构、晶粒尺寸和孔隙等, 可以显著优化其力学性能^[47]。目前, 从高于和低于 β 转变温度的各种热处理工艺, 包括各种固溶和淬火方案, 已被用于均匀化TC4合金的微观组织, 以提高其强度、塑性、硬度、疲劳和抗蠕变性等力学性能, 并为确定能够达到最佳组合性能的工艺参数条件提供规律性认识。

2.1 强度和塑性

热处理作为对电弧增材制造材料常用的性能改善方法之一, 能够显著提升TC4钛合金的强度和塑性。通

过细化晶粒, 位错强化、破碎晶界 α 相等组织调控方式, 达到较低的裂纹密度, 可以实现材料屈服强度、抗拉强度和伸长率的综合提高^[48]。Brandl等对电弧沉积TC4合金样品进行了不同方案的热处理, 发现600 °C/4 h保温后炉冷的工艺增加了强度^[49], 而843 °C/2 h保温后炉冷则增加了塑性。Bambach等采用将电弧沉积材料在热锻后在710 °C/2 h保温后空冷退火的方法, 测得原来沉积态样品的屈服应力和极限抗拉强度分别从原来的842 MPa和945 MPa增至922 MPa和980 MPa, 伸长率由原来7%增至14.5% (图8), 强度和塑性得到显著提高^[50], 产品性能可与铸造工件相媲美。

通过优化热处理工艺, 可以调控材料析出相, 以获得合金优良性能匹配的理想微观组织^[51]。电弧增材制造TC4合金存在的原始 β 柱状晶, 虽有助于提高塑性, 但会导致强度明显降低, 且沉积样品中存在的魏氏 α' 脆性相也会对材料塑性造成不利影响^[52]。对此, Todaro等研究指出, 采用低于 β 转变温度的热处理 (包括热等静压) 能够使原始 β 组织等轴且晶粒尺寸



(a) 锻造; (b) 电弧增材制造; (c) 电弧增材制造再经热锻后在710 °C/2 h保温后空冷退火

图8 TC4合金在不同工艺制造下的屈服强度、抗拉强度和伸长率对比

Fig. 8 Comparison of yield strength, tensile strength and elongation of TC4 alloy in different processes

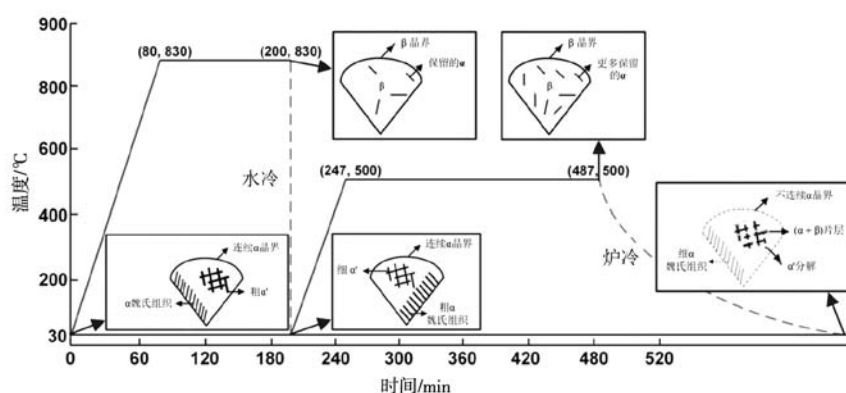


图9 热处理过程中的分步相变示意图

Fig. 9 Schematic illustration of step-by-step phase evolution during the heat treatment

α 魏氏组织宽度增加, α' 马氏体细化, 对晶界 α 相几乎没有影响; 时效过程将使 α 魏氏组织细化, α' 马氏体分解, 同时使晶界 α 相细化且不连续。

Wang等对930 °C/1 h固溶+800 °C/2 h时效的样品进行力学性能测试分析, 指出组织中细而分散、具有不同结晶取向的 α s起到较强的弥散强化作用提高了强度, 并引起变形匹配和相容性提高了塑性^[27]; 同时热处理后因 β 相中V的界面偏析获得了较多的 α/β 界面, 使试样的极限抗拉强度和伸长率由沉积态的847 MPa和12.2%分别提高到886 MPa和16.6%, 得到了强度和塑性的最佳组合。Bermingham等研究了一系列不同热处理工艺对电弧增材TC4部件微观结构和拉伸性能的影响, 指出 $\beta \rightarrow \alpha$ 转变过程中相对较慢的冷却速率 ($10 \sim 20 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$) 所产生的魏氏 α 相提供了强度和塑性之间的最佳平衡^[36], 并给出了 α 晶粒尺寸与抗拉强度

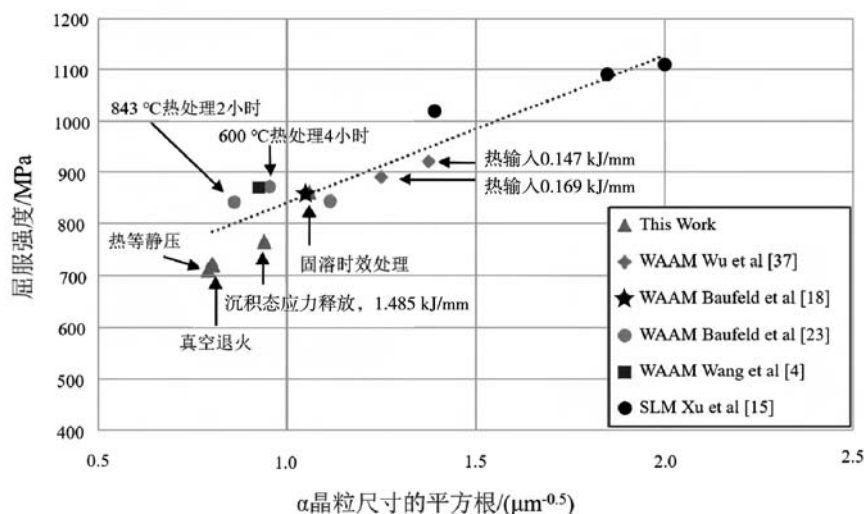
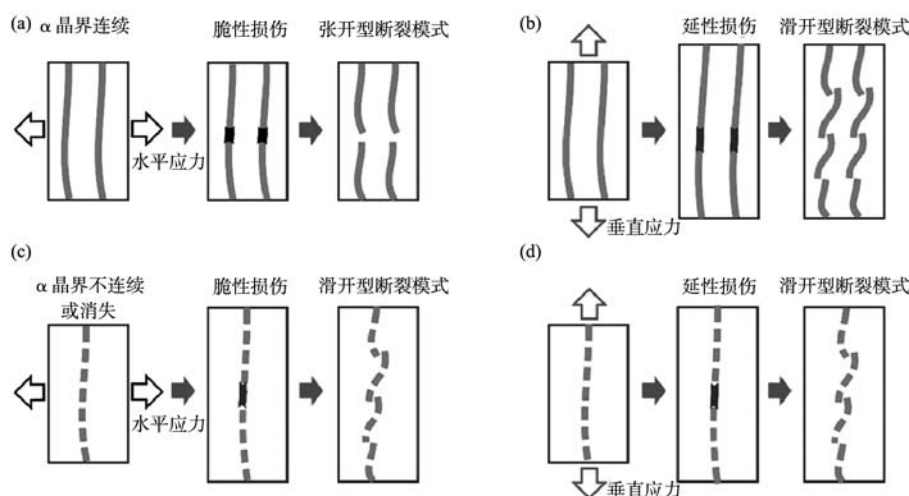
减小, 组织显著弱化, 提高强度-塑性的综合性能^[53]。Abu-Issa等对增材制造TC4合金工件的热处理研究表明, 采用850 °C热等静压 (HIP) 工艺并以102 °C/min缓慢冷却, 在 β 柱状晶内部产生了致密的魏氏 α 结构^[54], 针状 α' 马氏体分解形成了柱状颗粒, 能够实现900 MPa的屈服强度、1 000 MPa的极限抗拉强度以及约14%的伸长率。

通过调控产生内部缺陷, 能够阻碍位错运动以强化合金, 但此方法会造成材料的塑性和韧性下降, 而细化晶粒尺寸, 增加晶界的方法就能够在不损失其他性能的情况下提高强度^[1]。Lin等对制备出的电弧增材制造Ti-6Al-4V试样使用Gleeble热模拟机进行工艺试验分析, 在具有不同热处理温度的样品中创建了微观结构梯度, 确定出830 °C/2 h固溶+500 °C/4 h保温后炉冷为最佳热处理工艺^[55], 在此条件热处理后的屈服强度提高了12.85%、极限抗拉强度提高了3.33%, 其热处理过程中的分步相变如图9所示^[55]。其固溶过程使得晶界

之间的Hall-Petch关系 (图10)^[36]。

连续与非连续的晶界 α 相具有不同的断裂机制。当TC4合金中晶界 α 的不连续比例达到一定程度时, 能够提高合金强度, 获得材料塑性的各向同性。Xie等研究了近 β 相变温度下的固溶和时效处理对TC4合金显微组织和拉伸性能的影响, 观察到层状再结晶和 α' 马氏体分解形成了精细的层状 $\alpha + \beta$ 结构和不连续的晶界 α , 将屈服强度提高到904 MPa, 同时保持15.4%以上的高伸长率^[37]。并发现当晶界 α 的不连续比大于0.6时, 不连续的晶界 α 使水平试样的裂纹扩展失效形式从张开型转变为滑开型, 材料塑性的各向异性消失, 此时连续晶界 α 和非连续晶界 α 在不同加载应力下的断裂机制如图11所示^[37]。该结果为无需复杂的逐层塑性变形提高TC4合金的强度和伸长率提供了研究思路。

基于上述试验研究分析, 通过热处理调控以产生

图10 屈服强度与 α 晶粒尺寸的Hall-Petch关系Fig. 10 Hall-Petch relationship between yield strength and α grain size图11 连续 α_{GB} 和非连续 α_{GB} 的不同断裂机制示意图, (a)和(b)为连续 α_{GB} 沿水平方向和垂直方向施加应力时, (c)和(d)为非连续 α_{GB} 沿水平方向和垂直方向施加应力时的情况^[37]Fig. 11 The schematic diagrams of different fracture mechanisms of continuous α_{GB} and discontinuous α_{GB} , (a) and (b) for continuous α_{GB} with stress applied along the horizontal and vertical directions, (c) and (d) for discontinuous α_{GB} with stress applied along the horizontal and vertical directions^[37]

更多的 α/β 界面、精细的层状 $\alpha+\beta$ 结构和不连续的晶界 α 能够有效提高TC4合金的强度和塑性。热处理工艺对TC4合金电弧增材制造的强度和塑性的调控,体现在对微观结构消除脆性相并细化晶粒(主要针对柱状原始 β 晶粒),以期达到强度和塑性的理想组合。

热处理工艺使电弧增材制造TC4合金组织发生了较为明显的变化,对TC4合金力学性能产生重要的影响,如表1列举并比较了不同热处理工艺条件下的电弧增材制造TC4钛合金力学性能。可以看出真空退火工艺对屈服强度和抗拉强度的改变不大,而对伸长率有显著的提高。830 °C/2 h固溶+500 °C/4 h保温后炉冷的热处理,使屈服强度获得较大提高,且抗拉强度增加,

而伸长率小幅下降。967 °C/1 h固溶+595 °C/2 h时效的热处理,能使屈服强度和抗拉强度大幅增加,但伸长率受到较大损失。而930 °C/1 h固溶+800 °C/2 h时效的热处理,能够使工件获得屈服强度增加、且伸长率大幅提高,强度和塑性获得较理想的同步提升。文献中还指出,热等静压工艺对材料的强度影响不大,而使伸长率获得极大提高^[36],其可以消除缩孔、缩松等缺陷,使工件致密化。

2.2 硬度

热处理工艺可以通过利用 α' 马氏体的强化,晶体中缺陷等机制,提高电弧增材制造TC4合金的硬度。

表1 不同热处理工艺条件下的电弧增材制造TC4钛合金力学性能比较
Table 1 Comparison of mechanical properties of TC4 titanium alloy manufactured by arc additive under different heat treatment process conditions

热处理工艺条件	屈服强度		抗拉强度		伸长率		参考文献
	/MPa	相比沉积态增幅/%	/MPa	相比沉积态增幅/%	/%	相比沉积态增幅/%	
VA: 927 ℃/2 h/FC	721 ± 16.4	1.55	810 ± 9	-1.22	11.5 ± 4.2	60.17	[36]
VA: 834 ℃/2 h/FC	875 ± 20	0.11	947 ± 15	-0.57	17.1 ± 3.5	39.59	
AT: 600 ℃/4 h/FC	902.5 ± 12.5	3.14	952.5 ± 3.5	2.94	9.2 ± 2.6	-24.90	
ST: 830 ℃/2 h/WC + AT: 500 ℃/4 h/FC	902.6	12.85	946.5	3.33	5.4	-3.37	[55]
ST: 930 ℃/1 h/WQ + AT: 800 ℃/2 h/AC			886 ± 8	4.60	16.6 ± 1.6	36.07	[27]
ST: 950 ℃/2 h/WC + AT: 550 ℃/4 h/AC	904				15.5		[37]
ST: 967 ℃/1 h/WQ + AT: 595 ℃/2 h/AC	858 ± 39.2	20.85	918 ± 30.4	11.95	5.9 ± 1.1	-18.52	[36]
HIP	712 ± 11.5	0.28	800 ± 11.6	-2.44	11.0 ± 1.68	53.20	

注：①VA：真空退火；②FC：炉冷；③AT：时效处理；④ST：固溶处理；⑤WC：水冷；⑥WQ：水淬；⑦AC：空冷；⑧HIP：热等静压

Wang等^[27]发现电弧增材制造TC4合金试样经930 ℃/1 h固溶+550 ℃/4 h保温空冷后，凭借α'马氏体强化和细分散粒状α_s的弥散强化，试样的平均显微硬度可由原来的HV 298增至HV 356。Bruschi等研究了耦合加工和热处理对增材制造TC4钛合金的性能影响^[56]，发现在不同切削速度和进给量的条件下，经耦合加工后样品表面的显微硬度约HV 360，而经热处理可将硬度增至HV 425左右，与沉积态的HV 335相比增加了高达28%。原因是热处理使样品表面形成了一层极薄的球状微观结构，在该层下延伸几十微米又形成由α相和一定量α'马氏体组成的转变层，其亚结构包含位错和堆垛层错缺陷，使样品亚表面硬度显著增加。此外，随着工件表面硬度增高，样品摩擦系数有所降低，有助于降低工件的磨损率。

Gou等对采用冷金属过渡（CMT）制造的TC4样品进行了900 ℃/4 h热处理，发现α'马氏体溶解成层状

α + β 结构^[39]，平均硬度由原来的HV 350增至HV 379。此外，另有研究指出^[57-58]，通过进一步优化热处理工艺能够实现更显著的沉淀硬化效果，使合金材料达到更高的硬度和抗拉强度。Lin等在实验研究中发现，电弧沉积后的Ti-6Al-4V试样在进行830 ℃/2 h的固溶处理后，由于在水冷过程中形成了更多的细小α'组织^[55]，平均硬度由HV 326.6升至HV 351.4；若对固溶处理后的工件接着在500 ℃/4 h时效，由于不连续晶界α层强化，而同时α'马氏体分解且魏氏α片层组织减少，两方面对硬度的影响相抵消，相比固溶处理后硬度基本不变，其硬度分布如图12所示^[55]。

2.3 疲劳性能与抗蠕变性

电弧增材制造TC4合金的疲劳性能，与其微观结构和内部缺陷（如孔隙率）等因素密切相关^[59]，而热处理会显著影响原始β相和α相等形态特征，进而影响

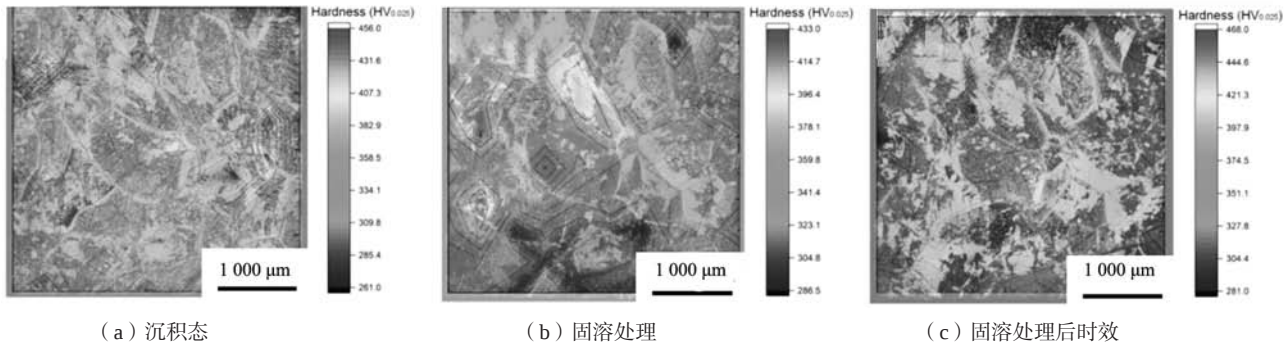
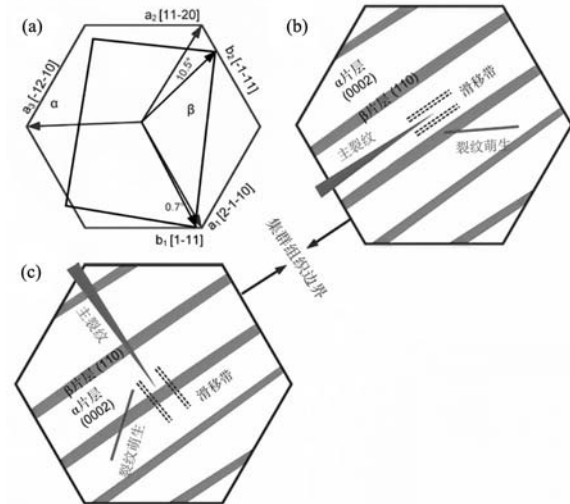


图12 热处理各步骤后的硬度分布
Fig. 12 Hardness distribution after each heat treatment step

其疲劳裂纹扩展阻力^[38]。采用适当的热处理工艺,可以改变材料抗疲劳裂纹扩展性,实现电弧增材制造TC4合金卓越的抗疲劳性能。Qian等研究指出,电弧增材制造TC4合金工件经热等静压工艺后,显示出在107个循环下 ≥ 550 MPa的高周疲劳性能,这基本与轧制退火产品的疲劳性能相同^[58]。同时,与传统热处理的电弧增材TC4合金相比,经热等静压后的产品疲劳强度各向异性程度要小得多,内部孔隙和缺陷是造成疲劳各向异性的主要原因。

热处理对电弧增材制造TC4合金疲劳性能的影响方面,目前学者主要就材料的疲劳裂纹扩展行为、疲劳极限测定等方面开展实验研究。Xie等研究了不同热处理条件下电弧增材TC4样品的短周疲劳裂纹扩展行为,发现对900 ℃、950 ℃加热并水冷时效的样品,裂纹均穿过集群或网篮状组织的微结构并产生偏转,造成89.1~210.6 μm 的中间裂纹波动范围;而1 050 ℃空冷时效试样的短裂纹以裂纹分叉或裂纹偏斜切穿集束组织,并沿集束组织边界或 α 片层生长^[45],造成最大的裂纹波动幅度213 μm 。揭示短疲劳裂纹扩展行为由 α/β 界面的最高施密特因子(M)、伯格取向关系(BOR)和临界分切应力(τ_{CRSS})等因素决定。由于在短裂纹尖端的塑性区域尺寸小于晶粒尺寸,故短疲劳裂纹扩展行为由材料的微观组织结构决定。而其中 α 片层的硬度低于 β 相,更易发生变形,故 α 片层的变形模式又直接决定了微观组织的变形模式。对 α 片层中的不同裂纹生长行为研究发现, α/β 界面保持了 $\{0002\}\alpha//\{110\}\beta$, $\langle 11\bar{2}0\rangle\alpha//\langle 1\bar{1}1\rangle\beta$ 的伯格取向关系(BOR) (图13a)^[45]。当裂纹扩展方向与 α 片层平行时(图13b)^[45],裂纹的塑性区位于 α 片的滑动带内,裂纹随柱面滑移或锥面滑移而生长,并在裂纹尖端有新的微裂纹成核。当裂纹扩展方向与 α 片层垂直时(图13c)^[45],裂纹随柱面滑移或基面滑移而生长,裂纹尖端与多个 α 片层和 α/β 界面相互作用,在 α 片层和 α/β 界面上出现了变形,并产生新的微裂纹和滑移带。并且,裂纹扩展路径与 α 片层宽度有关,而滑

移台阶的出现也增加了短疲劳裂纹的扩展长度和偏转程度。



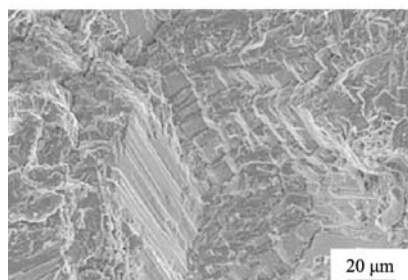
(a) 伯格取向关系 (BOR); (b) 裂纹与 α 片层平行; (c) 裂纹与 α 片层垂直

图13 α 片层的不同的裂纹扩展行为

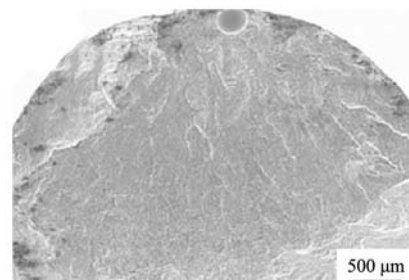
Fig. 13 Different crack growth behavior in the lamellae α

此外, Baufeld等尝试测定了经热处理后成型金属沉积试样的疲劳寿命,由于疲劳实验在寿命到失效的巨大波动下本质上会受到影响,难以确定准确的疲劳极限^[60]。对x沉积方向热处理的试样(图14^[60])进行疲劳测定发现,断裂面通常非常粗糙,有时可识别出沿集束组织的穿晶断裂;试样在 1.7×10^5 次循环后失效,最大载荷为800 MPa,而断裂裂纹略过切割 α 片层组织、优先沿 α/β 界面延伸,与其他试样在最薄的横截面处失效不同。

抗蠕变性是衡量电弧增材制造TC4合金高温下力学性能的重要指标,而通过恰当的热处理工艺能够提升电弧增材制造TC4合金的抗蠕变性能。热处理工艺的温度选择对TC4合金的抗蠕变性有着重要的影响。在对工件进行固溶处理时,应根据TC4合金中 α 、 β 相的析



(a) 高倍



(b) 低倍

图14 试样断裂表面在 1.7×10^5 次循环后失效、最大载荷为800 MPa的组织

Fig. 14 Fracture surface of a SMD x-specimen failed after 1.7×10^5 cycles with a maximum load of 800 MPa

出和溶解规律选择恰当的固溶温度,以获得合适的晶粒度,使工件的高温抗蠕变性能达到使用要求,同时保证后续时效处理过程能够析出均匀细小的强化相。文献研究表明,在固溶时效处理到略低于 β 转变温度后,在原始 β 晶粒中可以观察到细小的针状 α 结构,其与等轴 α 晶粒相比表现出更高的屈服强度和塑性^[38],同时抗疲劳裂纹扩展性和高温蠕变性能均得以增强。Hayat等研究指出,电弧增材制造TC4合金抗蠕变性能的影响因素有 $\alpha+\beta$ 相的形态、晶粒尺寸和各相体积分数等^[61],可以通过热处理增加 α/β 界面的数量,减少晶粒边界滑动和位错源以阻碍位错运动,提升抗蠕变性;此外,原始平均晶粒尺寸、形成原位强化等也会影响上述因素,从而改变整体蠕变性能。Spigarelli等对增材制造TC4试样在不同温度下研究其退火后合金的蠕变反应,结果发现在 β 相变温度以上退火的合金试样^[62],由于其显微组织具有更精细的 α/β 界面间隙, α/β 界面的数量更多,表现出相比于 β 相变温度以下退火的相同材料更低的最小蠕变速率,这说明 β 相变温度以上的退火温度更有利于提高TC4合金的抗蠕变性。

3 结束语

电弧增材制造TC4合金的力学性能很大程度上取决于微观组织特征,而其微观组织调控主要由热处理工艺决定。本文通过对近年来热处理工艺关于电弧增材制造TC4合金微观组织演化和力学性能影响的相关文献进行总结梳理,为确定能够达到最佳组织与性能的热处理工艺条件提供了规律性认识,并阐明了其组织和性能的调控机制,最后对发展方向和亟需解决的问题进行了展望。

(1)为抑制粗大晶粒形成,消除组织不均匀性,现阶段对电弧增材制造TC4合金的热处理工艺主要从柱状晶向等轴晶的转变、细化针状 α 相以及 α 片层组织

等方面实现组织调控,进而实现组织的均匀化和精细化,保证性能各向同性。但对如何更精确地实现组织转变,并更深入地研究微观结构形成机制、阐明晶粒演化机理,仍需更全面深入的研究认识。

(2)通过细化晶粒尺寸、优化析出相等,热处理后TC4合金的力学性能能够得到显著改善。热处理对TC4合金力学性能的调控,主要体现在使原始 β 组织更加等轴、晶粒尺寸细化、脆性相消除,形成起到较强弥散强化作用的 α s,并产生较多的 α/β 界面、精细的层状 $\alpha+\beta$ 结构和 α 晶界破碎等方面,以使材料同时获得理想的强韧性、硬度、疲劳和抗蠕变性能。

(3)针对WAAM工件成形精度较低等缺陷以及组织性能的进一步优化问题,在增材材料上可考虑通过调控合金元素成分以开发出更适合WAAM过程的新型丝材,或在增材层间添加中间层以改善晶粒生长方式,以利于细化组织,降低各向异性。在增材工艺上,有必要优化热源、控制熔滴过渡,根据特定材料选择合适的增材工艺参数;为了减少增材层间的热累积,可考虑采用复合带温减材加工的方法改善构件的表层形貌,对其切削机理问题进行深入研究可对WAAM工件的成形形貌进行更精准的控制。此外,采用例如激光-电弧复合增材或激光诱导电弧增材制等方法,综合多个热源的优势,可利于提高工件成形精度、提升增材效率;当前开发出的增减材复合制造、超声波或机械振动等辅助增材的方法,使得更多粗大的 β 柱状晶破碎为等轴晶,能够改善液态金属流动性,减少应力残留,有效提升其组织性能。

(4)影响电弧增材制造TC4合金热处理组织性能的工艺参数较多,采用计算机数值模拟、大数据及数字孪生技术等,进一步建立微观结构中的晶粒取向、晶粒尺寸、孔隙,以及热处理过程中的热输入、工艺参数等相关因素与性能之间的联系,有助于进一步提高电弧增材制造TC4合金的组织 and 性能。

参考文献:

- [1] LU K. The future of metals [J]. Science, 2010, 328: 319–320.
- [2] WANG J, PAN Z X, WANG L, et al. In-situ dual wire arc additive manufacturing of NiTi-coating on Ti6Al4V alloys: microstructure characterization and mechanical properties [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 386: 125439.
- [3] MISHUROVA T, SYDOW B, THIEDE T, et al. Residual stress and microstructure of a Ti-6Al-4V wire arc additive manufacturing hybrid demonstrator [J]. Metals, 2020, 10 (6): 701–715.
- [4] 贾传宝, 宋亚东, 王卫, 等. 金属材料电弧增材制造技术研究现状 [J]. 稀有金属, 2023, 47 (5): 633–646.
- [5] WANG C, SUDER W, DING J L, et al. The effect of wire size on high deposition rate wire and plasma arc additive manufacture of Ti-6Al-4V [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 288: 116842.
- [6] DEBROY T, MUKHERJEE T, WEI H L, et al. Metallurgy, mechanistic models and machine learning in metal printing [J]. Nature

- Reviews Materials, 2021, 6: 48–68.
- [7] BÖCKIN D, TILLMAN A. Environmental assessment of additive manufacturing in the automotive industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 226: 977–987.
- [8] RÍOS S, COLEGROVE P, MARTINA F, et al. Analytical process model for wire+arc additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 651–657.
- [9] JAFARI D, VANEKER T H J, GIBSON I. Wire and arc additive manufacturing: opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts [J]. Materials & Design, 2021, 202: 109471.
- [10] LI N, HUANG S, ZHANG G D, et al. Progress in additive manufacturing on new materials: a review [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35 (2): 242–269.
- [11] GUDUR S, NAGALLAPATI V, PAWAR S, et al. A study on the effect of substrate heating and cooling on bead geometry in wire arc additive manufacturing and its correlation with cooling rate [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 41 (2): 431–436.
- [12] 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, 2020, 772: 138654.
- [13] CHEN C, CHEN F R, YANG Y H, et al. Study on appearance and mechanical behavior of additively manufacturing of Ti-6Al-4V alloy by using cold metal transfer [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2021, 35: 250–258.
- [14] 鲁涛, 敬石开, 聂靖轩, 等. 电弧增材制造钛合金成形工艺与过程控制 [J]. 稀有金属, 2023, 47 (5): 618–632.
- [15] ZHONG H Z, QIAN M, HOU W, et al. The β phase evolution in Ti-6Al-4V additively manufactured by laser metal deposition due to cyclic phase transformations [J]. Materials Letters, 2018, 216: 50–53.
- [16] XIN H H, TARUS I, CHENG L, et al. Experiments and numerical simulation of wire and arc additive manufactured steel materials [J]. Structures, 2021, 34: 1393–1402.
- [17] LI Z X, LIU C M, XU T Q, et al. Reducing arc heat input and obtaining equiaxed grains by hot-wire method during arc additive manufacturing titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 742: 287–294.
- [18] SYED A K, ZHANG X, DAVIS A E, et al. Effect of deposition strategies on fatigue crack growth behaviour of wire + arc additive manufactured titanium alloy Ti-6Al-4V [J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 814: 141194.
- [19] WU B T, PAN Z X, LI S Y, et al. The anisotropic corrosion behaviour of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V alloy in 3.5% NaCl solution [J]. Corrosion Science, 2018, 137: 176–183.
- [20] SYED A K, ZHANG X, CABALLERO A, et al. Influence of deposition strategies on tensile and fatigue properties in a wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 149: 106268.
- [21] CHEN L Y, LIANG S X, LIU Y J, et al. Additive manufacturing of metallic lattice structures: unconstrained design, accurate fabrication, fascinated performances, and challenges [J]. Materials Science and Engineering R, 2021, 146: 100648.
- [22] CHI J X, CAI Z Y, WAN Z D, et al. Effects of heat treatment combined with laser shock peening on wire and arc additive manufactured Ti17 titanium alloy: microstructures, residual stress and mechanical properties [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 396: 125908.
- [23] YAN T Q, CHEN B Q, JI X, et al. Influence of hot isostatic pressing on microstructure, properties and deformability of selective laser melting TC4 alloy [J]. China Foundry, 2021, 18 (4): 389–396.
- [24] BENEDETTI M, TORRESANIA E, LEONIB M, et al. The effect of post-sintering treatments on the fatigue and biological behavior of Ti-6Al-4V ELI parts made by selective laser melting [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 71: 295–306.
- [25] LAN L, JIN X Y, GAO S, et al. Microstructural evolution and stress state related to mechanical properties of electron beam melted Ti-6Al-4V alloy modified by laser shock peening [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 50: 153–161.
- [26] GALARRAGA H, WARREN R J, LADOS D A, et al. Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM) [J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 685: 417–428.
- [27] WANG J, LIN X, WANG M, et al. Effects of subtransus heat treatments on microstructure features and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 776: 139020.
- [28] SMISMANS T, CHERNOVOL N, LAUWERS B, et al. Influence of post-heat treatments on fatigue response of low-alloyed carbon-manganese steel material manufactured by direct energy deposition-arc technique [J]. Materials Letters, 2021, 302: 130465.
- [29] GU D D, SHI X Y, POPRAWA R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing [J]. Science, 2021, 372 (6545): 101126.
- [30] 薛松海, 李重阳, 李雪辰, 等. 热处理工艺对铸造/激光增材制造复合制备Ti-6Al-4V合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (7): 800–805.
- [31] LIN J J, LV Y H, LIU Y X, et al. Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 69: 19–29.
- [32] BAUFELD B, BIEST O, GAULT R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties [J]. Materials & Design, 2010, 31: S106–S111.
- [33] YANG M, WANG L, YAN W T. Phase-field modeling of grain evolutions in additive manufacturing from nucleation, growth, to

- coarsening [J]. *Computational Materials Science*, 2021, 7: 56–67.
- [34] WANG L, ZHANG Y L, HUA X M. Twin-wire plasma arc additive manufacturing of the Ti-45Al titanium aluminide: processing, microstructures and mechanical properties [J]. *Intermetallics*, 2021, 136: 107277.
- [35] ARTAZA T, SUAREZ A, VEIGA F, et al. Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: analysis of heat-treatment processes in different atmospheres [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9 (6) : 15454–15466.
- [36] BERMINGHAM M J, NICASTRO L, KENT D, et al. Optimising the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire plus arc additive manufacturing with post-process heat treatments [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 753: 247–255.
- [37] XIE Y, GONG M C, ZHANG R Z, et al. Grain boundary discontinuity and performance improvement mechanism of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 869 (12) : 159287.
- [38] GAO Y F, WU C D, PENG K, et al. Towards superior fatigue crack growth resistance of TC4-DT alloy by in-situ rolled wire-arc additive manufacturing [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 1395–1407.
- [39] GOU J, SHEN J Q, HU S S, et al. Microstructure and mechanical properties of as-built and heat-treated Ti-6Al-4V alloy prepared by cold metal transfer additive manufacturing [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 42: 41–50.
- [40] COLEGROVE P A, DONOGHUE J, MARTINA F, et al. Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components [J]. *Scripta Materialia*, 2017, 135: 111–118.
- [41] BERMINGHAM M J, KENT D, ZHAN H, et al. Controlling the microstructure and properties of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V with trace boron additions [J]. *Acta Materialia*, 2015, 91: 289–303.
- [42] ZHUO Y M, YANG C L, FAN C L, et al. Grain refinement of wire arc additive manufactured titanium alloy by the combined method of boron addition and low frequency pulse arc [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 805: 140557.
- [43] CHEN X L, LIANG Z L, GUO Y H, et al. A study on the grain refinement mechanism of Ti-6Al-4V alloy produced by wire arc additive manufacturing using hydrogenation treatment processes [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 890: 161634.
- [44] ZHUO Y M, YANG C L, FAN C L, et al. Grain morphology evolution mechanism of titanium alloy by the combination of pulsed arc and solution element during wire arc additive manufacturing [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 888: 161641.
- [45] XIE Y, GONG M C, LUO Z W, et al. Effect of microstructure on short fatigue crack growth of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V [J]. *Materials Characterization*, 2021, 177: 111183.
- [46] WILSON-HEID A E, WANG Z Q, MCCORNAC B, et al. Quantitative relationship between anisotropic strain to failure and grain morphology in additively manufactured Ti-6Al-4V [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2017, 706: 287–294.
- [47] ROSLI N A, ALKAHARI M R, ABDOLLAH M F, et al. Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 11: 2127–2145.
- [48] PAN Z Q, ZHANG H O, SONG X L, et al. Influence of micro-rolling on the strength and ductility of plasma-arc additively manufactured Ti-6Al-4V alloys [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 465–473.
- [49] BRANDL E, BAUFELD B, LEYENS C, et al. Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications [J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 595–606.
- [50] BAMBACH M, SIZOVA I, SYDOW B, et al. Hybrid manufacturing of components from Ti-6Al-4V by metal forming and wire-arc additive manufacturing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 282 (4) : 116689.
- [51] PANWISAWAS C, TANG Y T, REED R C. Metal 3D printing as a disruptive technology for superalloys [J]. *Nature Communications*, 2020, 11 (1) : 2327–2330.
- [52] LIN Z D, SONG K J, YU X H. A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 70 (3) : 24–45.
- [53] TODARO C J, EASTON M A, QIU D, et al. Grain structure control during metal 3D printing by high-intensity ultrasound [J]. *Nature Communications*, 2020, 11 (1) : 142–150.
- [54] ABU-ISSA A, LOPEZ M, PICKETT C, et al. Effects of altered hot isostatic pressing treatments on the microstructures and mechanical performance of electron beam melted Ti-6Al-4V [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9 (4) : 8735–8743.
- [55] LIN Z D, SONG K J, CASTRIC B D, et al. Microstructure-gradient approach for effective determination of post-heat treatment temperature of an additive manufactured Ti-6Al-4V sample [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 921: 165630.
- [56] BRUSCHI S, BERTOLINI R, GHIOTTI A. Coupling machining and heat treatment to enhance the wear behaviour of an additive manufactured Ti6Al4V titanium alloy [J]. *Tribology International*, 2017, 116: 58–68.
- [57] ZHANG D Y, QIU D, GIBSON M A, et al. Additive manufacturing of ultrafine-grained high-strength titanium alloys [J]. *Nature*, 2019, 576 (7785) : 91–95.
- [58] QIAN M, XU W, BRANDT M, et al. Additive manufacturing and postprocessing of Ti-6Al-4V for superior mechanical properties [J]. *MRS Bulletin*, 2016, 41 (10) : 775–784.
- [59] BARTSCH H, KÜHNE R, CITARELLI S, et al. Fatigue analysis of wire arc additive manufactured (3D printed) components with

- unmilled surface [J]. Structures, 2021, 31: 576–589.
- [60] BAUFELD B, BRANDL E, BIEST O. Wire based additive layer manufacturing: comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211 (6) : 1146–1158.
- [61] HAYAT M D, SINGH H, HE Z, et al. Titanium metal matrix composites: an overview [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 121: 418–438.
- [62] SPIGARELLI S, PAOLETTI C, CERRI E, et al. Creep response of Ti-6Al-4V alloy produced by additive manufacturing: Effect of annealing at 1 050 °C [J]. Materials Science and Engineering A, 2022, 860: 144278.

Effect of the Heat Treatment on the Microstructures and Properties of TC4 Alloy Fabricated by WAAM

LAN Zhong-lin¹, WANG Yu-feng², YIN Lai-sheng³, FU Bin-guo^{1,2}, LI Guo-lu¹, LIU Jin-hai¹

(1. Key Laboratory for New Type of Functional Materials in Hebei Province, School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Tianjin Institute of Aerospace Mechanical and Electrical Equipment, Tianjin 300301, China; 3. Kewei Zhiyun (Tianjin) Technology Co., Ltd., Tianjin 300467, China)

Abstract:

Wire arc additive manufacturing (WAAM) of TC4 titanium alloy has the advantages of low cost and high deposition rate compared to traditional manufacturing process, and has broad application prospects. However, the deposition process can cause uneven microstructure and residual stress, resulting in anisotropy of its mechanical properties. Therefore, appropriate heat treatment processes need to be adopted to eliminate adverse effects and further meet the performance requirements. This paper reviews relevant literatures on the effects of heat treatment on the microstructure and properties of TC4 alloy produced by WAAM both domestically and internationally in recent years. It comprehensively analyzes the influence mechanism of heat treatment on the formation and refinement of equiaxed grains in TC4 alloy, and discusses the factors and mechanisms of heat treatment process on the mechanical properties such as strength, ductility, hardness, fatigue, and creep resistance of TC4 alloy. Finally, the research on the regulation of the microstructure and properties of TC4 alloy by WAAM post heat treatment process was prospected.

Key words:

wire arc additive manufacturing; TC4 alloy; heat treatment; microstructure; mechanical property
