固溶处理对锻/增复合成形 TC4 钛合金件的显微组织和力学性能的影响

王亚辉[1,2,3] 黄 亮[1,2*] 刘 翔[1,2]
1.华中科技大学材料科学与工程学院,武汉,430074
2.华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室,武汉,430074
3.华中科技大学工程实践创新中心,武汉,430074

摘要:采用激光立体成形技术(LSF)在锻造 TC4 钛合金基体上进行锻/增复合成形,研究不同固溶热处理条件下 LSF 增材区域和锻造基体结合部分的微观组织演变以及复合成形 TC4 钛合金件的性能。结果表明,在炉冷或者空冷条件下,固溶热处理温度越高,复合成形结合处的 α/α′相逐渐长大变粗,且在 1040 ℃固溶处理条件下,原本较为明显的分界转变为一体的 α 片层组织;随着固溶温度升高,复合成形件的屈服强度和抗拉强度均下降;固溶处理的冷却方式对结合处的微观组织有影响,空冷得到 α 相宽度小于炉冷的 α 相宽度;在炉冷条件下,固溶温度越高,结合处的硬度越低,且结合处附近的微观硬度要高于远离结合处的硬度。

关键词:TC4 钛合金;力学性能;微观组织;固溶处理
中图分类号:TG146.2
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.018 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Effects of Solution Treatment on Microstructure and Mechanics Properties of TC4 Titanium Alloy Parts Formed by Forging/Additive Manufacturing Composite Forming

WANG Yahui[1,2,3] HUANG Liang[1,2*] LIU Xiang[1,2]
1.School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074
2.State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074
3.Engineering Practice Innovation Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

Abstract: Laser solid forming (LSF) technology was used to perform compound forming on the forged TC4 titanium alloy substrates. The microstructure evolution of LSF additive manufacturing areas and the joint parts of forged substrates under different solid solution heat treatment conditions and the properties of TC4 titanium alloy were studied. The results show that under the conditions of furnace cooling or air cooling, the higher the solution heat treatment temperature, the α / α′ phase at the joints of composite forming gradually grows and coarsens. Under the condition of solution treatment at 1040 ℃, the original obvious joint zones are transformed into a homogeneous α-colony structure. With the increase of solution temperature, the yield strength and tensile strength of the composite parts decrease. The cooling mode of solution treatment has effects on the microstructure of the joint zones, the width of α phase under air cooling conditions is smaller than that under furnace cooling conditions. Under the conditions of furnace cooling, the higher the solution temperature the lower the hardness of the joint zones, and the microhardness near the joint zones is higher than that far away from the joint zones.

Key words: TC4 alloy; mechanics property; microstructure; solution treatment

0 引言

TC4 钛合金是一种具有高强综合性能的 α+β 型钛合金,具有密度小、综合力学性能优、耐腐蚀性好等优点,广泛应用于航空航天、建筑、化工等领域[1-3]。然而,钛合金构件的传统锻造方法存在制造周期长、材料利用率低、可成形造型有限、成本高、结构冗余等缺点,亟需一种新的成形工艺方法解决上述问题。与传统钛合金构件锻造方法

收稿日期:2025-00-00
基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1106003)

相比，新兴的激光增材技术——激光立体成形(laser solid forming，LSF)技术具有周期短、效率高、可实现复杂零件成形等优点[4]，将传统钛合金构件的锻造方法与激光增材制造技术相结合，能够弥补传统锻造钛合金构件方法的缺点，在制造钛合金构件上具有良好的应用前景。锻造和增材制造复合成形技术的原理是根据构件的结构特征将其分为锻造制造区域和增材制造区域，对简单的造型区域采用锻造制造，对复杂造型如薄壁、腔体等造型采用增材制造，兼备传统锻造和增材制造的优点，同时在钛合金构件修复或再制造上使用增材制造技术[5]，也是该复合成形方法的重要应用。

影响锻造和增材制造复合成形 TC4 钛合金件性能的关键在于基体与增材的结合区域。热处理对结合区的微观形貌和性能都有很重要的影响，通过适当的热处理工艺可以优化 TC4 复合制件结合区的组织和性能，从而使整体复合制造件的组织和性能达到国家标准。关于钛合金的热处理研究，国内外学者也做了大量相关工作。TIAN 等[6]研究了不同固溶温度和冷却速度对激光沉积钛合金的影响，较高的冷却速度能形成细薄的转变 β 组织，从而提高钛合金件的强度。REN 等[7]研究了固溶热处理对增材区组织的影响，转变 β 组织增多，且转变 β 组织里的次生 α 相比增材区的初生 α 相要小得多。ZHANG 等[8]研究表明，随着固溶温度的升高，初生条状 α 相的宽度增加，同时体积分数减小，导致 TC4 钛合金强度下降，延伸率提高。目前，对增材制造的 TC4 钛合金构件热处理的研究较为丰富，但多集中于研究热处理对增材制造构件微观组织和性能的影响，对增材和锻造复合成形的 TC4 钛合金构件固溶处理研究相对较少。由于增材和锻造复合成形的结构件性能受结合区组织和性能影响，因此有必要研究固溶处理对复合成形件结合区的影响。

TC4 钛合金通过锻/增复合成形制备时，对于增材区域，固溶处理可以有效改善其力学性能，但对于结合区域，需要考虑不同固溶处理工艺对各种力学性能的综合影响，进而获得最合适的固溶处理方案。本文研究固溶处理对复合成形 TC4 钛合金件结合区组织和性能的影响，并对不同固溶处理后结合区组织的形成机制进行了分析。

1　材料及实验方法

本实验所采用的增材基体为锻态 TC4 钛合金，基体为 20 mm×30 mm×100 mm 的长方体。锻造工艺如下：950 ℃自由锤锻，变形量为 20%～40%，空冷，其微观组织见图 1。

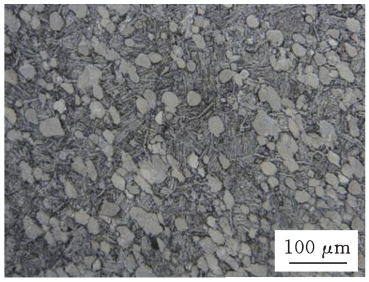


图 1　TC4 钛合金锻造基体微观组织

Fig.1　Microstructure of TC4 alloy substrate

实验所采用的激光增材部分(additive manufacturing area，AM area)的钛合金粉末由旋转电极雾化法制造，颗粒度为 75～150 μm(图 2)，成分见表 1，使用前在真空炉中进行烘干。

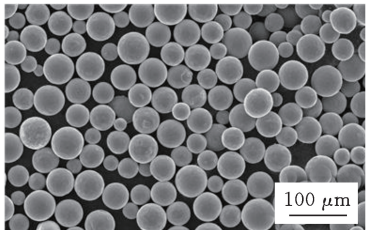


图 2　TC4 钛合金粉末扫描电镜图

Fig.2　Scanning electron micrograph of TC4 alloy powder

表 1　TC4 钛合金基体和粉末的化学成分(质量分数)

Tab.1　Chemical compositions of forging TC4 alloy substrate and powders(mass fraction)　%

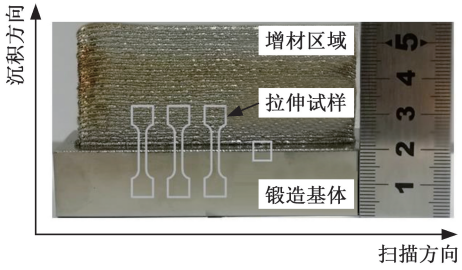
元素	基体	粉末
Al	6.36	6.13
V	4.20	4.01
Fe	0.03	0.179
C	0.02	0.006
N	0.01	0.003
O	0.14	0.067
H	0.0019	0.004
Ti	89.2381	89.601

实验增材部分采用的是铂力特 C1000 同轴送粉增材设备制备的 LSF 成形件。实验前用砂纸打磨基体表面去掉氧化层，然后用丙酮清洗后吹干。激光增材部分采用表 2 所示的激光工艺参数，在基体上堆积 5 mm×30 mm×80 mm 的单道薄壁，扫描方式为往复扫描。样件实物图以及拉伸试样选取如图 3 所示，拉伸试样选取位置见图 3a，拉伸件尺寸见图 3b。采用不同工艺对复合

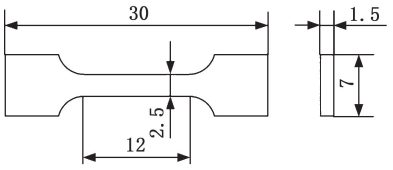
表 2　激光沉积工艺参数

Tab.2　Process parameters of laser deposition

类型	参数
激光功率/W	2500
扫描速度/(mm·s^{-1})	15
送粉速度/(g·min^{-1})	20
光斑直径/mm	6



(a)拉伸试样选取位置



(b)拉伸件尺寸

图 3　复合成形工件以及拉伸试样的选取

Fig.3　Composite forming component and Tensile specimens

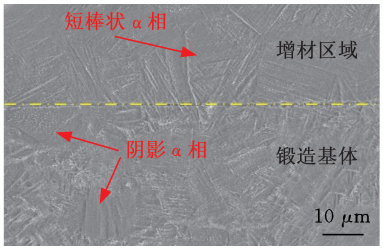
成形 TC4 钛合金的工件进行固溶处理，其温度分别为 800 ℃、880 ℃、960 ℃和 1040 ℃，保温时间均为 1 h，冷却方式分别为炉冷和空冷。

2　结果与讨论

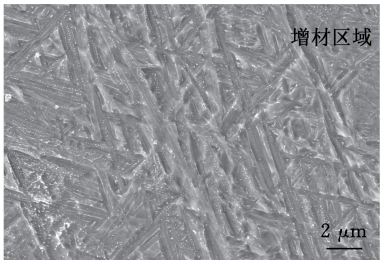
2.1　固溶处理下的微观组织演变

2.1.1　微观组织演变

图 4a 为 SEM 电镜下未经任何热处理的复合成形件结合处微观组织图，上部分为增材区域，下部分为锻造基体。结合处上部分的增材区域为典型的网篮组织[9-10]，激光热源使粉末熔化熔池温度达到 2000 ℃以上，形成粗大的 β 晶粒组织，随着热源远去，从 β 晶内析出的棒状 α 相和针状 α′相[11-12]互相交错分布且截断形成。图 4b 为增材区域的放大图，由图 4b 可知，短棒状 α 相的宽度在 0.5 μm 左右。在结合区下方，基体受激光增材前面几层材料产生的热量影响，初生 α 相恢复成逐渐溶解的中间状态，尺寸大小为 10 ～30 μm，称为“阴影 α 相”[13-14]。



(a)结合处

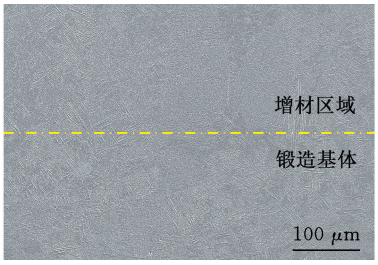


(b)放大的增材区

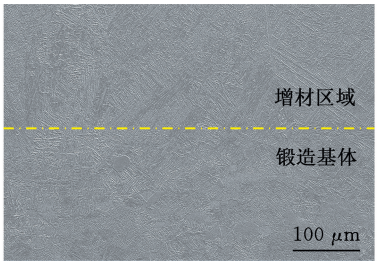
图 4　未经热处理的工件结合区域微观组织图

Fig.4　Micrograph of microstructures in bonding area of composite forming component

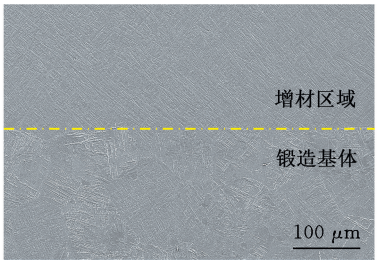
图 5、图 6 所示分别为空冷和炉冷条件下不同固溶温度下的电镜微观组织形貌，图中黄色点划线为增材区域和基体区域的分界。空冷条件下，初始α相长大，β相转变为细板条状[6]。空冷



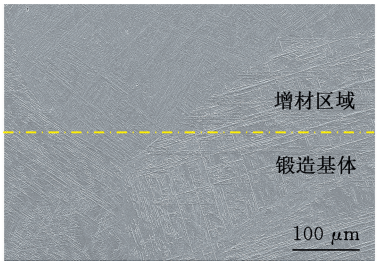
(a)800 ℃固溶温度＋空冷



(b)880 ℃固溶温度＋空冷



(c)960 ℃固溶温度＋空冷

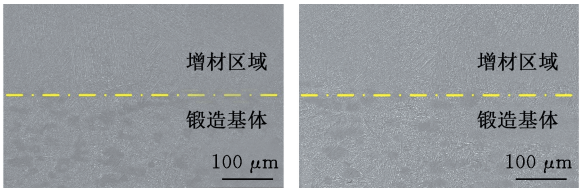


(d)1040 ℃固溶温度＋空冷

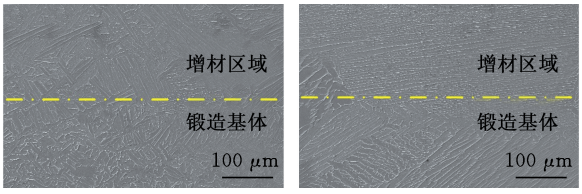
图 5　空冷条件下不同固溶温度的结合区形貌

Fig.5　Microstructures in bonding area of different solution temperatures under air cooling condition

冷却速度较快，形成的 α 相没有互相融合的过程，冷却过程中互相截断，导致相比于炉冷的片层状 α 相更细更短，见图 5a、图 5b、图 5c。而在炉冷条件下，较低的冷却速度导致原先细小的片层状 α 相生长合并从而粗化[15]，见图 6a、图 6b、图 6c。在 1040 ℃固溶温度下，炉冷和空冷的基体区域微观组织和增材区区域的微观组织已经没有明显的界限，都是较大片的片层状 α 相，这是因为 1040 ℃已经超过 T_β（β 相转变温度），原先结合区附近的细小短棒状 α 相和基体双态组织都重新经历了 α 相向 β 相转变再重新冷却形成片层状的 α 相的过程，见图 5d 和图 6d。在 1040 ℃固溶处理条件下，相比于空冷，炉冷的次生 α 相更粗大。



(a)800 ℃固溶温度＋炉冷　(b)880 ℃固溶温度＋炉冷



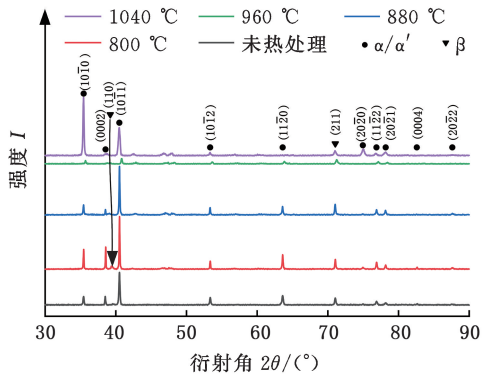
(c)960 ℃固溶温度＋炉冷　(d)1040 ℃固溶温度＋炉冷

图 6　炉冷条件下不同热处理温度的结合区形貌

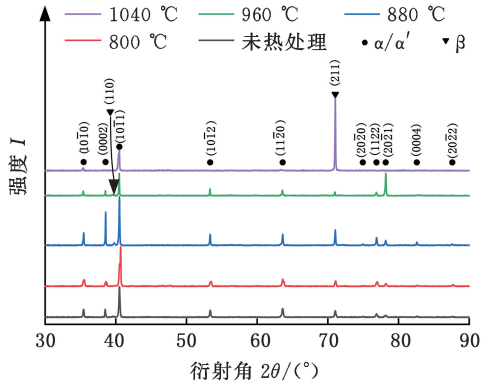
Fig.6　Microstructures in bonding area of different solution temperatures under furnace cooling condition

由图 5c 和图 6c 可知，炉冷条件下的冷却速度较慢，存在一定的保温效果，在炉冷的过程中，原子扩散进行得更充分，有利于次生 α 相的形核、生长和融合，形成的片层状 α 相更粗[16]。随着固溶温度升高，最后形成的 α 相片层变得粗大[14,17-18]，这是因为在固溶退火过程中，晶界差异较小的 α 相可能受热发生融合，导致新生成的 α 相长大。

图 7 为不同固溶温度条件下结合处附近的 XRD 图谱。在空冷条件下，未作任何热处理的样件结合处 β 相占比非常小，800 ℃固溶处理后样件相比于未作热处理的样件其 β 相比例略有升高，在 960 ℃和 1040 ℃固溶 1 h 空冷以后，基本上不存在 β 相，1040 ℃固溶热处理后样件晶面取向为$(10\bar{1}0)$的 α/α′相占比较高（图 7a）。在炉冷条件下，800 ℃/880 ℃固溶温度下 β 相比例随着固溶温度升高而升高，960 ℃固溶温度下 β 相的比例下降，1040 ℃固溶温度下 β 相的比例升高且晶面取向为(211)的 β 相较多（图 7b）。



(a)空冷条件下的 XRD 衍射图谱



(b)炉冷条件下的 XRD 衍射图谱

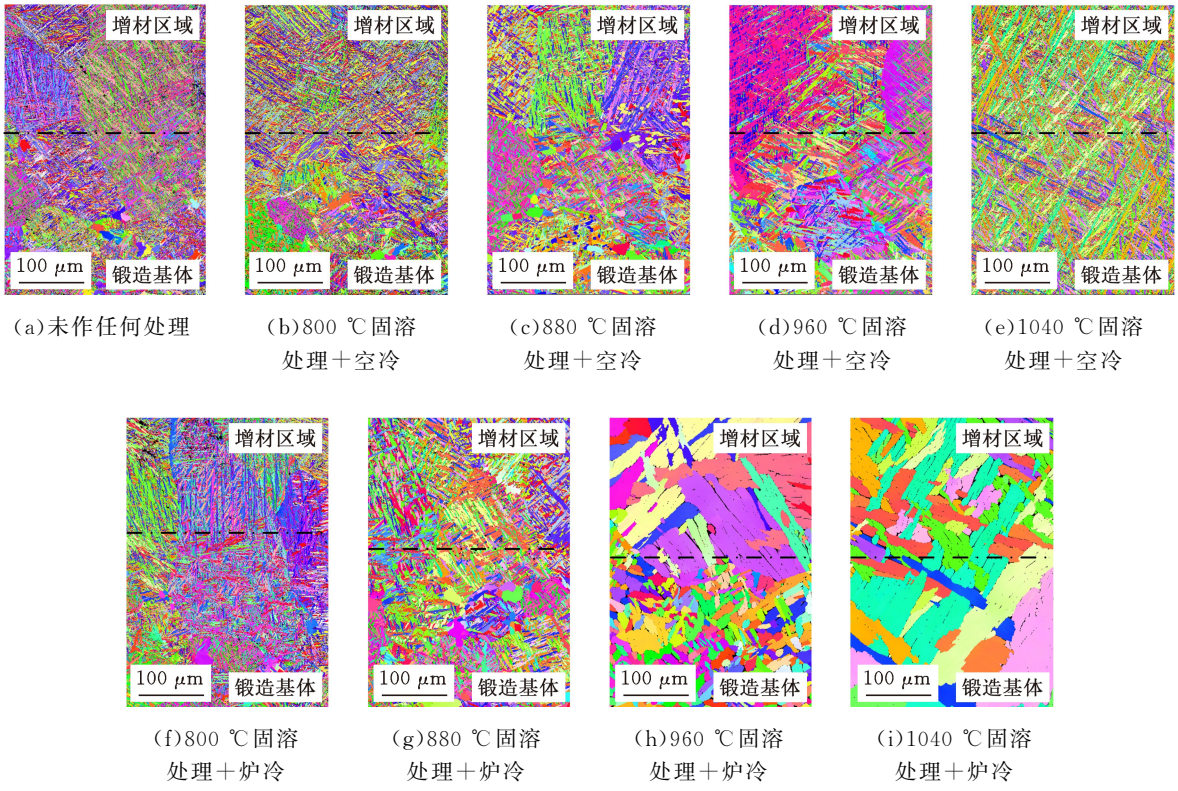
图 7　不同热处理温度后 XRD 衍射图谱

Fig.7　XRD patterns of different heat treatment temperatures

2.1.2　EBSD 分析

分别取未作热处理、固溶温度为 800 ℃/880 ℃/960 ℃/1040 ℃空冷、固溶温度为 800 ℃/880 ℃/960 ℃/1040 ℃炉冷条件下的样件结合区域做 EBSD 分析，得到图 8。图 8a 为未作任何处理的样件结合处附近区域 EBSD 图，上方为增材区，为网篮状结构，组织为针状 α 相，下方为锻造基体，为双态组织。图 8b、图 8c、图 8d、图 8e 为空冷条件下固溶温度为 800 ℃、880 ℃、960 ℃和 1040 ℃结合处附近的 EBSD 图，随着温度的升高，结合处下方锻造基体的双态组织逐渐溶解消失形成新的片层状 α 相，球状等轴 α 相逐渐转变为针状 α 相，且结合处附近的针状 α 相逐渐变粗变长，形成类似于增材区网篮组织的棒状 α 相，而原先增材区的细小的棒状 α 相变长变粗，见图 8e。图 8f、图 8g、图 8h、图 8i 为炉冷条件下固溶温度为 800 ℃、880 ℃、960 ℃和 1040 ℃结合处附近的 EBSD 图，炉冷和空冷不同，冷却速度较慢，随着温度升高增材区域的棒状 α 相变长变粗（图 8h 和图 8i），结合区域的针状 α 相也逐渐长大变粗[19-20]。炉冷和空冷条件下，随着固溶温度的升高，增材区域的 α 相均粗化；结合处的 α 相均逐渐消失，转变为 β 相冷却后再次转变为 α 相（次生 α 相），此时增材

区域和锻造区域已经形成一体;固溶处理过程中,当温度超过 T_β 时,锻造基体的等轴 α 相转变为 β 相,冷却过程中随着温度降低 β 相转变为次生 α 相。空冷和炉冷不同之处在于温度下降的速度不一样,炉冷温度下降的速度较慢,新形成的次生 α 相在冷却过程中逐渐长大。



(a)未作任何处理　(b)800 ℃固溶处理+空冷　(c)880 ℃固溶处理+空冷　(d)960 ℃固溶处理+空冷　(e)1040 ℃固溶处理+空冷

(f)800 ℃固溶处理+炉冷　(g)880 ℃固溶处理+炉冷　(h)960 ℃固溶处理+炉冷　(i)1040 ℃固溶处理+炉冷

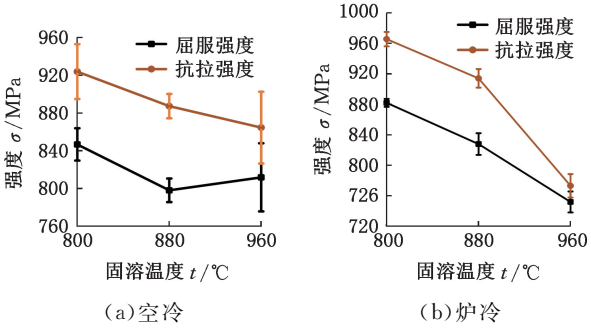
图 8　OXZ 平面上的 EBSD 图

Fig.8　EBSD map of OXZ plane

2.2　固溶处理对力学性能的影响

2.2.1　单向拉伸

在空冷和炉冷条件下,不同固溶温度与强度之间的关系见图 9。无论是空冷条件还是炉冷条件,800 ℃下的抗拉强度和屈服强度均最大,空冷抗拉强度和屈服强度分别为 924 MPa 和 847 MPa,炉冷条件下抗拉强度和屈服强度分别为 966 MPa和881 MPa。随着固溶温度升高,抗拉强度和屈服强度都呈现一定程度的减小,这是因为经过固溶处理后,细小的 α 相转变为较粗的次生 α 相,导致拉伸强度和屈服强度下降。固溶温度为 1040 ℃时,空冷的平均强度为 768 MPa,炉冷的平均强度为 676 MPa,空冷的强度比炉冷强度高,这是因为空冷得到的组织为网篮组织,炉冷得到的组织为大量片状 α 相和少量 β 相,炉冷得到 α 相的宽度比空冷的 α 相宽度大[14],所以 1040 ℃固溶处理后空冷得到的复合成形件强度要高于炉冷得到的复合成形件强度。延伸率和固溶温度之间的关系见图 10,固溶处理后试样的塑性下降[21],空冷条件下 800 ℃延伸率最好,整体趋势也是随着温度的升高而下降。这是因为温度越



(a)空冷　(b)炉冷

图 9　屈服强度和抗拉强度随温度变化的曲线

Fig.9　Curves of yield strength and tensile strength with temperature

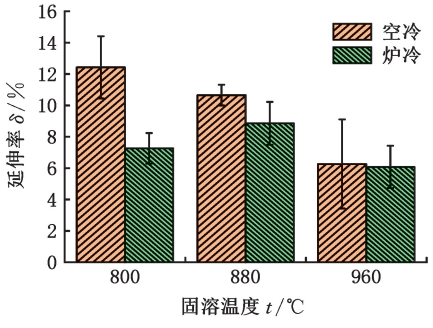
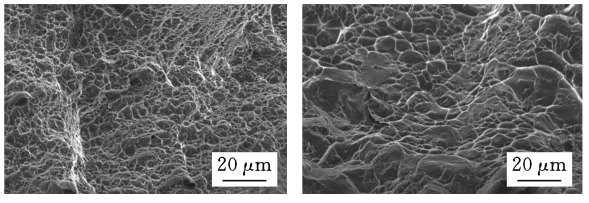


图 10　延伸率随温度的变化

Fig.10　Different elongation with solution temperature

高，晶粒越大，变形协调性越差，塑性越差。未作任何热处理的复合成形件其抗拉强度和屈服强度分别为 940 MPa 和 840 MPa，经过 800 ℃炉冷固溶热处理后其抗拉强度和屈服强度分别提高了 26 MPa 和 41 MPa。

图 11 所示为未作任何热处理的复合成形件拉伸样件的断口，断口在增材区和锻造基体区均有出现，图 11a 所示为断裂位置在增材区域的断口，图 11b 所示为断裂位置在锻造区域的断口。增材区域的组织为针状 α 相，在拉伸过程中容易造成应力集中，加速裂纹的产生，进而过早断裂。靠近增材区域的基体，由于增材过程中多次逐层往复沉积会产生热量，循环受热导致靠近结合区的组织不均匀，容易断裂。断裂在锻造基体的断口形貌，韧窝更浅更大，表现出来的抗拉强度和屈服强度比断裂在增材区域的拉伸件要低。空冷条件下，800 ℃和 880 ℃下拉伸试样断口位于增材区域，960 ℃和 1080 ℃下拉伸试样断口位于结合区附近。炉冷条件下，800 ℃和 880 ℃下拉伸试样断口位于增材区域，960 ℃下拉伸试样断口位置为结合区附近偏增材区，1080 ℃下拉伸试样断口位于结合区附近偏锻造基底区。在 800 ℃和 880 ℃固溶条件下，增材区组织长大，韧性下降，拉伸时容易出现断口。在固溶温度接近或超过 T_β 时，结合区和增材区组织基本一致，拉伸时断口容易出现在结合区附近。

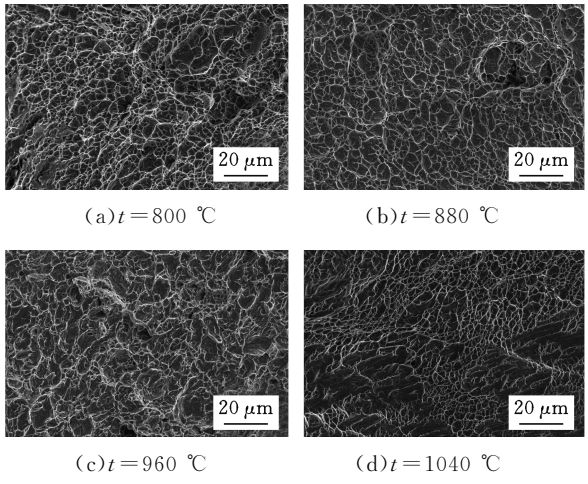


(a)增材区域　　(b)基体区域

图 11　未作热处理拉伸件断口形貌

Fig.11　Fracture morphology of tensile parts without heat treatment

图 12 和图 13 所示分别为空冷和炉冷条件下不同固溶温度热处理后拉伸试样的断口形貌，图 12a、图 12b 和图 13a、图 13b 都是韧性断裂，有较多的韧窝，随着热处理固溶温度的升高，断面的韧窝逐渐减少变浅，图 12c、图 12d 和图 13c、图 13d 均为混合断裂[22]，既有解理台阶，也有韧窝，这些断裂类型与它们所表现出来的拉伸性能相符合，即随着固溶热处理温度升高，屈服强度和抗拉强度下降，到 1040 ℃固溶温度时主要为脆性断裂[23]。

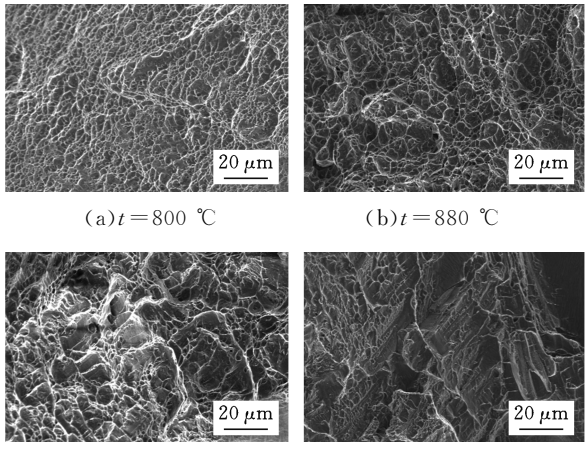


(a)t＝800 ℃　　(b)t＝880 ℃

(c)t＝960 ℃　　(d)t＝1040 ℃

图 12　空冷条件下不同固溶温度热处理拉伸件断口形貌

Fig.12　Fracture morphology of tensile parts at different solution temperatures under air cooling



(a)t＝800 ℃　　(b)t＝880 ℃

(c)t＝960 ℃　　(d)t＝1040 ℃

图 13　炉冷条件下不同固溶温度热处理拉伸件断口形貌

Fig.13　Fracture morphology of tensile parts at different solution temperatures under furnace cooling

2.2.2　微观硬度

图 14 所示为不同固溶温度热处理后样件结合区域附近的硬度，横坐标为测量点到结合处的位移，负值表示锻造基体方向，正值表示增材制造区域方向。针状 α′相和短棒状 α 相组织能增加结合区的硬度[24]，但是同时会降低结合区的延展性。空冷条件下的结合区附近大部分区域硬度范围在 300 HV～315 HV 之间。炉冷条件下，冷却速度较慢，固溶温度在相变温度以下的微观组织里的 α 相尺寸较小，硬度较高，微观组织成分比较稳定，800 ℃固溶热处理条件下 α 相尺寸最小，所以硬度最高。1040 ℃固溶热处理条件下硬度最低，这是因为它们的微观组织形成的 α 相粗大且长。

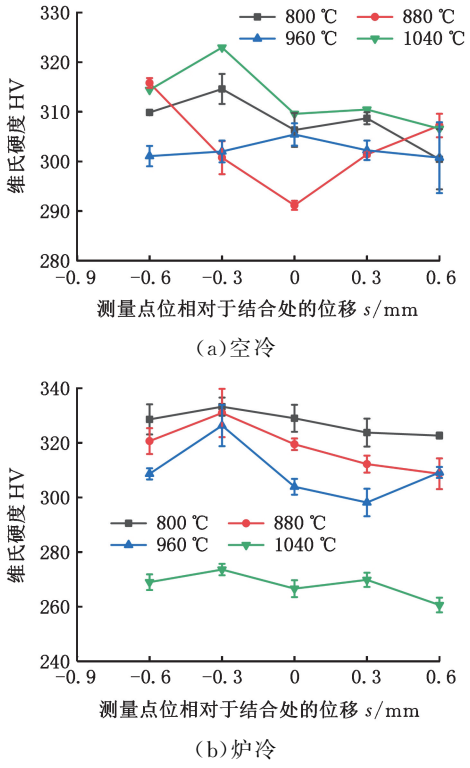


图 14　不同固溶温度热处理后微观硬度的变化

Fig.14　Microhardness after heat treatment at different solution temperatures

3　结论

对增材制造和锻造结合的复合成形 TC4 钛合金件进行不同条件的固溶热处理，并将性能和微观组织进行对比研究，结果表明：

1）固溶处理温度会影响结合区微观组织形貌，随着固溶温度升高，复合成形的 TC4 钛合金件结合处的组织由细小短棒状 α 相逐渐长大变粗。在 β 相转变温度（T_β）以下，增材和锻造区域的微观分区仍比较明显，但随着固溶温度升高，微观组织逐渐趋于一致。固溶温度超过 T_β 以后，原本明显的基体和增材区分界已经变为一体的转变 β 相组织（次生 α 相和少量保留 β 相）。

2）随着固溶温度升高，无论冷却方式是空冷还是炉冷，复合成形的 TC4 钛合金件屈服强度和抗拉强度均随着温度升高而下降。当固溶温度超过 T_β 温度后，拉伸试样主要为脆性断裂。

3）固溶温度 800 ℃、保温 1 h 炉冷条件下的锻增复合成形 TC4 钛合金件抗拉强度和屈服强度最大，硬度最高，但延伸率一般。空冷条件下样品的片层 α 相宽度要小于炉冷条件下的样品片层 α 相宽度。同时炉冷条件下固溶温度越高，硬度越低，且结合处周围的硬度要高于远离结合处的硬度。

参考文献：

[1] LUETJERING G, WILLIAMS J C. Titanium[M]. 2nd ed.Heidelberg: Springer, 2007

[2] BANERJEE D, WILLIAMS J C. Perspectives on Titanium Science and Technology[J]Acta Materialia, 2013, 61(3):844-879.

[3] 闫辰侃，曲寿江，冯艾寒，等. 钛及钛合金形变孪晶的研究进展[J].稀有金属，2019，43(5):449-460.
YAN Chenkan, QU Shoujiang, FENG Aihan, et al. Recent Advances of Deformation Twins in Titanium and Titanium Alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019, 43(5):449-460.

[4] 黄卫东，李延民，冯莉萍，等. 金属材料激光立体成形技术[J]. 材料工程，2002(3):40-43.
HUANG Weidong, LI Yanmin, FENG Liping, et al. Laser Solid Forming of Metal Powder Materials [J]. Journal of Materials Engineering, 2002(3):40-43.

[5] 张高，刘梅军，韩嘉琪，等.压气机整体叶盘修复再制造的研究进展[J].航空材料学报，2024，44(3):65-81.
ZHANG Gao, LIU Meijun, HAN Jiaqi, et al. Research Progress in Repair and Remanufacture of Compressor Blisk[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024,44(3):65-81.

[6] TIAN X J, ZHANG S Q, WANG H M. The Influences of Anneal Temperature and Cooling Rate on Microstructure and Tensile Properties of Laser Deposited Ti-4Al-1.5Mn Titanium Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 608:95-101.

[7] REN Y M, LIN X, FU X, et al. Microstructure and Deformation Behavior of Ti-6A1-4V Alloy by High-power Laser Solid Forming[J]. Acta Materialia, 2017, 132:82-95.

[8] ZHANG Shuangyin, LIN Xin, CHEN Jing, et al. Heat-treated Microstructure and Mechanical Properties of Laser Solid Forming Ti-6Al-4V Alloy[J]. Rare Metals, 2009, 28(6):537-544.

[9] 许良，苏居季，周松，等.TC4 钛合金激光双光束焊 T 形接头疲劳性能及断裂机理[J].中国有色金属学报，2019，29(7):1408-1416.
XU Liang, SU Juji, ZHOU Song, et al. FatiguePerformance and Fracture Mechanism of Dual-beam Laser Welded T-joints of TC4 Titanium Alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(7):1408-1416.

[10] 王亚辉，黄亮，刘翔，等. 基于增材制造和锻造复合成形的 TC4 钛合金组织和性能研究[J].稀有金属，2021，45(8):897-904.
WANG Yahui, HUANG Liang, LIU Xiang, et al. Microstructure and Mechanical Properties of TC4

Alloy Formed by Additive Manufacturing Combined with Forging[J]. Chinese Journal of Rare Metals. 2021, 45(8):897-904.

[11] SUN Kun, XIANG Wenli, SHU Xingzhu. Effects of Different Orietations on Mechanical Proprieties of Laser Rapid Forming Ti-6Al-4V Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(3):566-570.

[12] LONG Jian, ZHANG Linjie, ZHU Lei, et al. Comparison of Low-cycle Fatigue Properties of Two Kinds of High Energy Beam Welded Joints of TC4 Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(11):3376-3386.

[13] LIU Hanqing, WANG Haomin, ZHANG Zhen, et al. Enhancing the Mechanical Properties of Electron Beam Welded TC17 Titanium Alloy Joint by Post-weld Heat Treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 810:151937.

[14] CHEN Yuanhang, YANG Chunli, FAN Chenglei, et al. Microstructure Evolution Mechanism and Mechanical Properties of TC11-TC17 Dual Alloy after Annealing Treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020,842:155874.

[15] VRANCKEN B , THIJS L , KRUTH J P , et al. Heat Treatment of Ti6Al4V Produced by Selective Laser Melting: Microstructure and Mechanical Properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 541:177-185.

[16] 张志强，董利民，胡明，等.冷却速率对 TC16 钛合金显微组织和力学性能的影响[J].中国有色金属学报，2019,29(7):1391-1398.
ZHANG Zhiqiang, DONG Limin, HU Ming, et al. Effect of Cooling Rate on Microstructure and Mechanical Properties of TC16 Titanium Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(7): 1391-1398.

[17] ZHUO L, LI Changmeng, LIU Dong, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Tensile Properties of Laser Deposited Titanium Alloy TC21[J]. Material Research Innovations, 2015, 18(S4):S4-929-S4-932.

[18] SHI Zhifeng, GUO Hongzhen, ZHANG Jianwei, et al. Microstructure-fracture Toughness Relationships and Toughening Mechanism of TC21 Titanium Alloy with Lamellar Microstructure[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(12):2440-2448.

[19] SHAO Hui, ZHAO Yongqing, GE Peng, et al. Influence of Cooling Rate and Aging on the Lamellar Microstructure and Fractography of TC21 Titanium Alloy[J]. Metallography Microstructure and Analysis, 2013,2(1):35-41.

[20] SU Meike, LIANG Zebao, ZHENG Lijing, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructures and Mechanical Properties in a Full Lamellar PM TiAl Alloy[J]. Materials Research, 2012,15(3):455-460.

[21] 钦兰云，李明东，杨光，等.热处理对激光沉积 TC4 钛合金组织与力学性能的影响[J].稀有金属，2018,42(7):698-704.
QIN Lanyun, LI Mingdong, YANG Guang, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Laser Deposition Manufacturing TC4 Titanium Alloy with Heat Treatment[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2018,42(7):698-704.

[22] WU Yongli, XIONG Yi, CHEN Zhengge, et al. Effect of Gas Pressure on Microstructure and Mechanical Properties of TC11 Titanium Alloy during Supersonic Fine Particle Bombardment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(8):2379-2394.

[23] 雷晓飞，董利民，张志强，等.固溶和时效温度对 TC6 钛合金显微组织与力学性能的影响[J].稀有金属材料与工程，2020,49(3):1038-1044.
LEI Xiaofei, DONG Limin, ZHANG Zhiqiang, et al. Effects of Solution-treatment and Aging Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of TC6 Titanium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020,49(3):1038-1044.

[24] PAYDAS H, MERTENS A, CARRUS R, et al. Laser Cladding as Repair Technology for Ti6Al4V Alloy: Influence of Building Strategy on Microstructure and Hardness[J]. Materials and Design, 2015, 85:497-510.

（编辑　王艳丽）

作者简介：王亚辉，男，1990 年生，硕士研究生。研究方向为增材制造、锻造成形。E-mail:wangyahui@hust.edu.cn。**黄　亮***（通信作者），男，1981 年生，教授、博士研究生导师。研究方向为高强韧金属材料及其特殊能场（电、磁、超声等）作用下大型高性能金属构件热成形理论和技术。E-mail:huangliang@hust.edu.cn。

本文引用格式：

王亚辉，黄亮，刘翔.固溶处理对锻/增复合成形 TC4 钛合金件的显微组织和力学性能的影响 [J]. 中国机械工程，2025,36(6):1314-1321.

WANG Yahui, HUANG Liang, LIU Xiang. Effects of Solution Treatment on Microstructure and Mechanics Properties of TC4 Titanium Alloy Parts Formed by Forging/Additive Manufacturing Composite Forming [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1314-1321.