

准 β 锻造工艺对TC21钛合金大型锻件组织及性能的影响

周晓虎¹, 刘卫¹, 郝芳^{2,3}, 毛友川², 赖运金⁴, 赵张龙³

(1. 西安三角防务股份有限公司, 陕西 西安 710089;

2. 西部超导材料科技股份有限公司 特种钛合金材料制备技术国家地方联合工程实验室, 陕西 西安 710018;

3. 西北工业大学 材料学院, 陕西 西安 710072; 4. 西安欧中材料科技有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 以TC21钛合金特大规格棒材及其制备的大型锻件为研究对象, 采用准 β 锻造工艺锻造TC21钛合金, 分析了3种不同锻造方案对锻件微观组织和力学性能的影响规律。结果表明: TC21钛合金可在相变点以上一定温度采用准 β 锻造工艺加工, 在不同的加热工艺参数下, 通过双重退火进行热处理, 均可获得较好的冶金组织和力学性能。TC21钛合金在准 β 锻造过程中, 不同的锻造温度和锻造火次均能获得较好的拉伸性能(1100 MPa左右)和断裂韧性(大于90 MPa·m^{1/2})。在准 β 锻造过程中, 较高的锻造温度有利于获得网篮组织, 合金的断裂韧性较高, 组织内片层 α 相存在粗化趋势; 较低的准 β 锻造温度有利于细化微观组织, 但锻造后组织中会有少量残余等轴 α 相存在。在锻造变形量相同的情况下, 较少锻造火次可以获得更加细小的微观组织, 但锻件不同部位的微观组织形态存在差异。

关键词: TC21钛合金; 准 β 锻造; 大型锻件; 力学性能; 微观组织

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2020.06.005

中图分类号: TG113.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3940(2020)06-0029-07

Influence of quasi- β forging process on microstructure and properties of TC21 titanium alloy large forgings

Zhou Xiaohu¹, Liu Wei¹, Hao Fang^{2,3}, Mao Youchuan², Lai Yunjin⁴, Zhao Zhanglong³

(1. Xi'an Triangle Defense Incorporated Company, Xi'an 710089, China;

2. NLEL for Special Titanium Alloy Material Manufacturing, Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

4. Sino-Euro Materials Technologies of Xi'an Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: For the TC21 titanium alloy oversized bar and the large forgings manufactured by it, TC21 titanium alloy was forged by the quasi- β forging process, and the influence laws of three different forging plans on the microstructure and mechanical properties of forgings were analyzed. The results show that the TC21 titanium alloy obtains better metallurgical structure and mechanical properties by quasi- β forging process at a certain temperature above the phase transformation point and under different heating process parameters as well as heat treatment by double annealing. Furthermore, TC21 titanium alloy obtains better tensile performance (about 1100 MPa) and fracture toughness (greater than 90 MPa·m^{1/2}) under different forging temperatures and forging fire times in the quasi- β forging process. In the process of quasi- β forging, the higher forging temperature is conducive to obtain the basket structure, the fracture toughness of alloy is higher, and the lamellar α phase of structure has a tendency to coarsen. However, the lower quasi- β forging temperature is conducive to the refinement of microstructure, but there is a small amount of residual equiaxed α phase in the structure after forging. Under the same amount of forging deformation, the finer microstructure is obtained by less forging fire times, but the microstructure morphologies at different positions of the forgings are different.

Key words: TC21 titanium alloy; quasi- β forging; large forgings; mechanical properties; microstructure

TC21钛合金(名义成分为Ti-6Al-2Zr-2Sn-3Mo-

1Cr-2Nb)是我国自行研制的一种高损伤容限 $\alpha + \beta$ 型钛合金, 具有高强、高韧和低的裂纹扩展速率等特点, 综合性能匹配较好, 被广泛应用于航空航天领域, 如飞机机身隔框、承重梁、发动机框架等强度要求较高的承力构件^[1-3]。热锻成形是TC21钛合金承力零件的主要成形方式, 基于TC21钛合金的高损伤容限特点, 要求锻件组织为网篮状的

收稿日期: 2020-03-02; 修订日期: 2020-05-08

基金项目: 陕西省重点研发计划(2018ZDXM-GY-132)

作者简介: 周晓虎(1975-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: zzhouxiaohu@126.com

通讯作者: 赖运金(1979-), 男, 博士, 教授级高级工程师

E-mail: 30149395@qq.com

片层组织,以获得高的断裂韧性 (K_{IC}) 和低的裂纹扩展速率,来满足飞机设计的低损伤容限、高可靠性要求。因此,微观组织控制对力学性能的匹配关系十分关键,而钛合金锻件要获得网篮状片层组织,需要在 $\alpha + \beta$ 相变点以上的 β 区域进行锻造。 β 锻造处理工艺是指在钛合金 β 相变点以上进行锻造或者热处理,目的是为了获得较高的断裂韧性^[4]。采用 β 锻造工艺可以大幅度降低钛合金的变形抗力,同时还可以提高锻件的综合性能,但是在变形过程中,由于温度过高,显微组织易出现粗大晶粒,会降低合金塑性和强度^[5]。而准 β 锻造工艺却可以弥补 β 锻造工艺的不足,即将钛合金加热到相变点附近的一定温度范围内进行锻造变形,可以获得较好的综合性能,还能避免晶粒长大^[6-7]。毕彦等^[8] 分别在相变温度下 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和相变温度上 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对 TC18 钛合金采用准 β 工艺进行了锻造,探究了工艺参数对合金组织和性能的影响,发现在准 β 温度范围内 30% 的变形量能够获得较为均匀的组织 and 优良的强韧性匹配。石志峰^[9] 和赖运金^[10] 分别以 TC21 和 Ti-17 两相钛合金为研究对象,讨论了钛合金的片层组织演化过程及其对合金强度、塑性以及断裂韧性等力学性能的影响,发现等轴 α 相含量的提高能够增加合金的塑性, α 片层的交叉分布和厚度的增加有利

于提高合金的断裂韧性。程新江等^[11] 在准 β 温度下对 TC21 钛合金小试样进行了热压缩实验,并基于位错密度和唯象理论建立了两种本构模型,发现 TC21 钛合金内部平均晶粒尺寸随应变速率的增加而减小。以往有关 TC21 钛合金 β /准 β 锻造工艺的研究主要集中在小试样热模拟或者小规格锻件两相区锻造的理论基础上,而对于工程化大规格棒材以及大型锻件准 β 锻造工艺的应用报道较少,尤其是大型框类模锻件未见文献报道。研究掌握不同锻造工艺对大尺寸坯料显微组织和力学性能的影响规律是进行 TC21 钛合金大型锻件研制及推广应用的前提条件。

本文采用准 β 锻造工艺,以 TC21 钛合金特大规格棒材及其制备的大型锻件为研究对象,研究了 3 种不同锻造工艺对 TC21 钛合金大型锻件显微组织和力学性能的影响规律,并获得了显微组织与综合性能的匹配规律,为 TC21 钛合金大型锻件的准 β 锻造工艺的推广奠定基础。

1 原材料与工艺方法

实验原材料为直径 $\Phi 400\text{ mm}$ 的 TC21 钛合金特大规格棒材,其化学成分和高、低倍组织分别如表 1 和图 1 所示。从图 1 可以看出,TC21 钛合金原材料

表 1 TC21 钛合金原材料的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of TC21 titanium alloy raw material (% , mass fraction)

Ti	Al	Mo	Nb	Sn	Zr	Cr	Si	Fe	C	N	H	O
基体	5.25 ~ 6.75	2.25 ~ 3.25	1.75 ~ 2.25	1.75 ~ 2.35	1.65 ~ 2.45	0.75 ~ 1.75	≤ 0.20	≤ 0.15	≤ 0.08	≤ 0.05	≤ 0.015	≤ 0.15

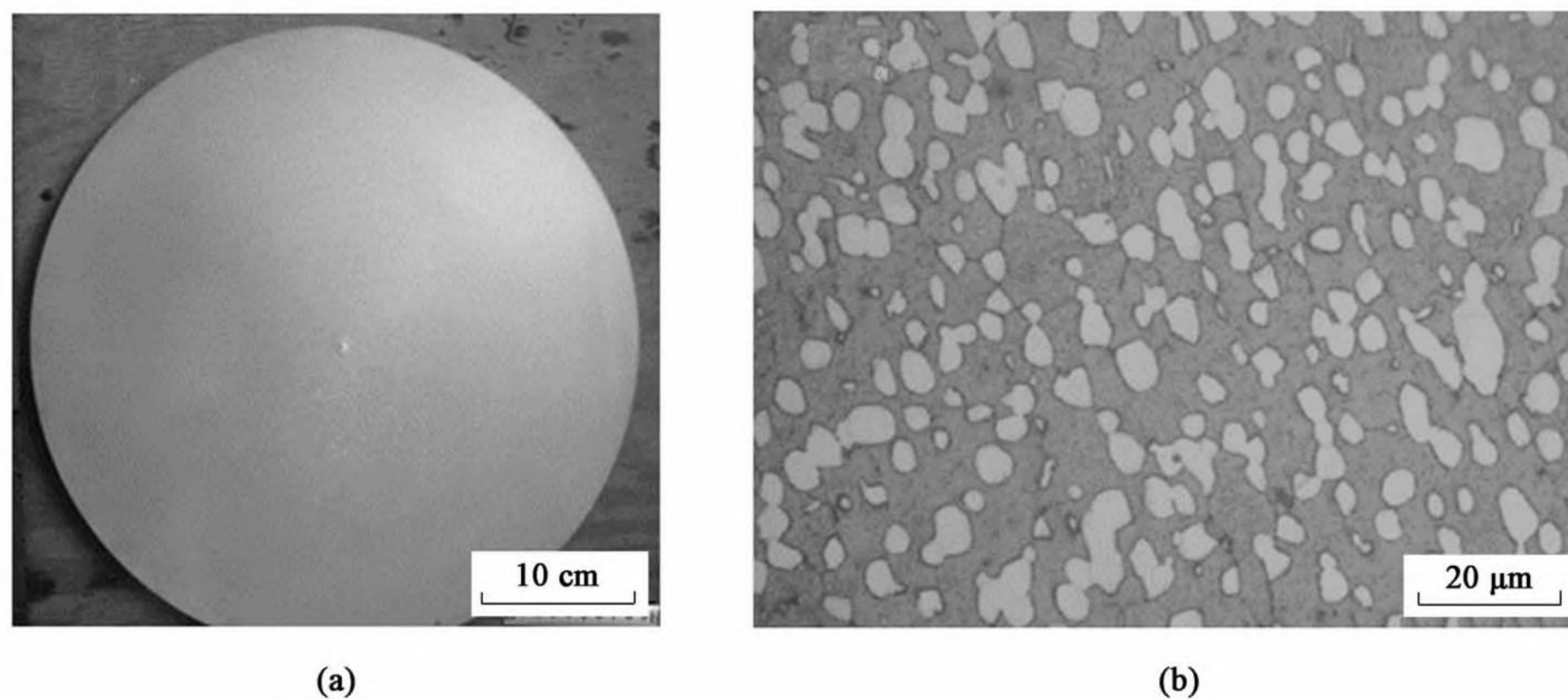


图 1 TC21 钛合金原材料显微组织

(a) 低倍组织 (b) 高倍组织

Fig. 1 Microstructures of TC21 titanium alloy raw material

(a) Macroscopic structure (b) Microscopic structure

棒材的低倍组织均匀，未见分层、裂纹、气孔、偏析、金属或者非金属夹杂及其他肉眼可见的冶金缺陷，无清晰晶粒。TC21 钛合金原材料棒材的高倍显微组织为典型的两相区变形态显微组织， α 相等轴化充分、均匀，不存在原始粗大晶粒和连续平直 α 片层。

TC21 钛合金锻件的基本生产工序为：原材料下料、自由锻制坯、模锻成形、热处理、理化检测、最终检验和产品入库交付。自由锻制坯和模锻工序分别在 31.5 MN 快锻机和 400 MN 大型模锻液压机上进行，锻造加热炉的炉温均匀性为 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，加热时锻件均放置于加热炉有效区中心处，试料处放置测温热电偶以监测实际温度。热处理工序在炉温均匀性为 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热处理炉内进行。为了掌握准 β 锻造工艺对 TC21 钛合金锻造成形的影响，制定了 3 种工艺方案进行某框类模锻件的准 β 锻造工艺试制与生产研究，具体方案如下。

(1) 方案 1：自由锻制坯 4 火，锻造温度为 $T_{\beta} - 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_{β} 为相变点温度)；模锻 2 火，模锻温度为 $T_{\beta} + 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 方案 2：自由锻制坯 4 火，锻造温度为 $T_{\beta} - 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；模锻 2 火，模锻温度为 $T_{\beta} + 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 方案 3：自由锻制坯 2 火，锻造温度为 $T_{\beta} - 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；模锻 1 火，模锻温度为 $T_{\beta} + 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

热处理制度均为 $T_{\beta} - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温时间为 200 min，空冷为 $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温时间为 300 min，空冷。

图 2 为 TC21 钛合金锻件取样图，本文中高倍组织试样、低倍组织试样及力学性能试样均取自于锻件试料区相同位置。

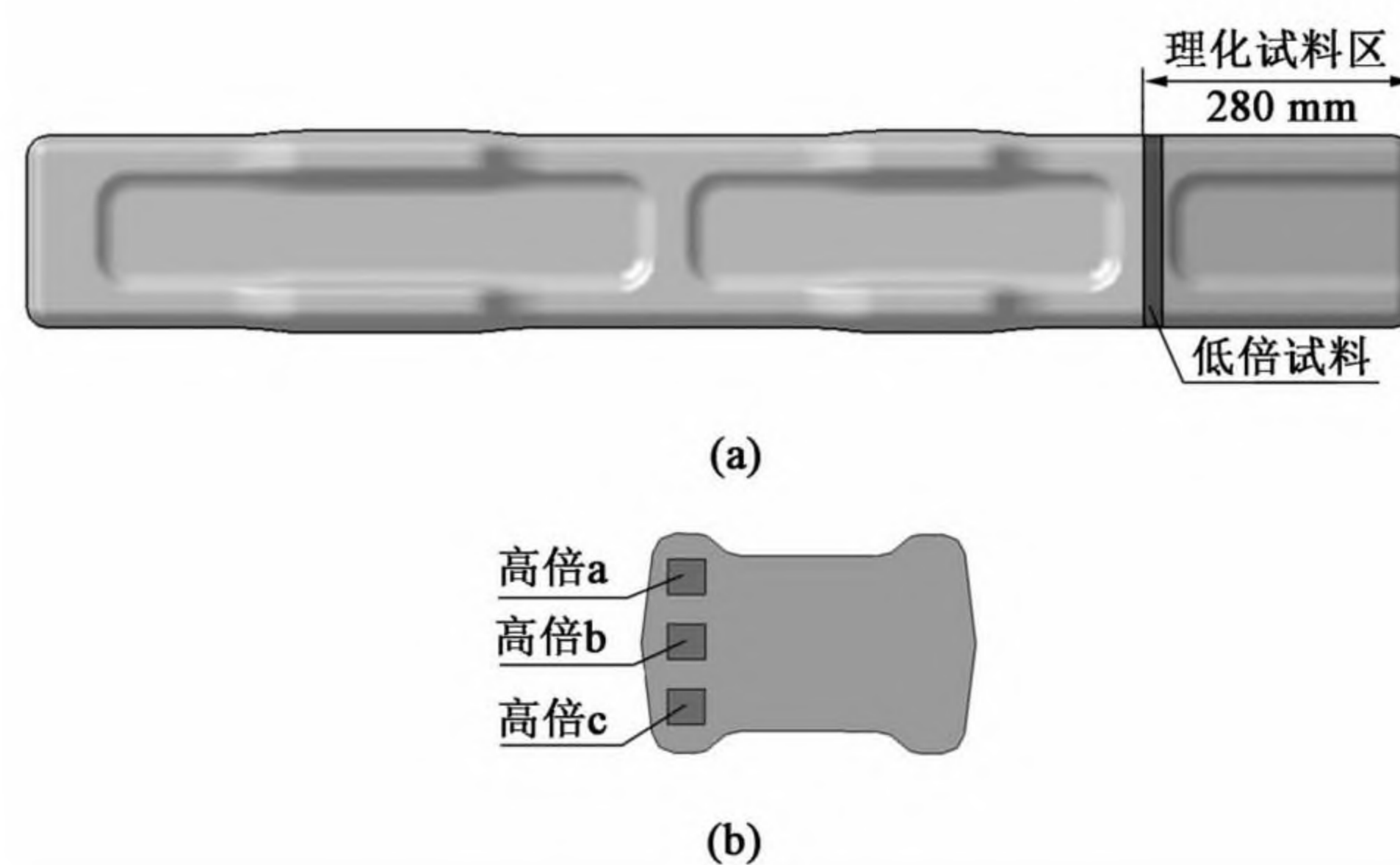


图 2 TC21 钛合金锻件取样示意图

(a) 低倍组织及理化试样取样示意图 (b) 高倍组织试样取样示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of sampling for TC21 titanium alloy forgings

(a) Schematic diagram of sampling for macrostructures and physical and chemical samples (b) Schematic diagram of sampling for microstructure sample

2 TC21 钛合金锻件组织和力学性能分析

2.1 TC21 钛合金锻件的宏观（低倍）组织分析

锻件试料尺寸为 $180\text{ mm} \times 180\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ (图 2)，截面厚度较大。图 3 为经 3 种准 β 锻造试制生产方案得到的 TC21 钛合金锻件低倍组织照片，从图 3 中可以看出，锻件试料的心部晶粒均比较细小，这主要是由于原材料规格大，采用了大厚度的预制坯，锻件心部锻造时产生了大的变形量，致使变形过程中发生了动态再结晶，从而使得组织细化^[12]。对比 3 种方案锻造后的锻件低倍组织可以看出，方案 1 和方案 2 锻件的低倍晶粒大小基本一致，方案 3 锻件的低倍晶粒明显小于前两种方案的锻后晶粒，这是由于方案 3 的自由锻和模锻过程中锻造

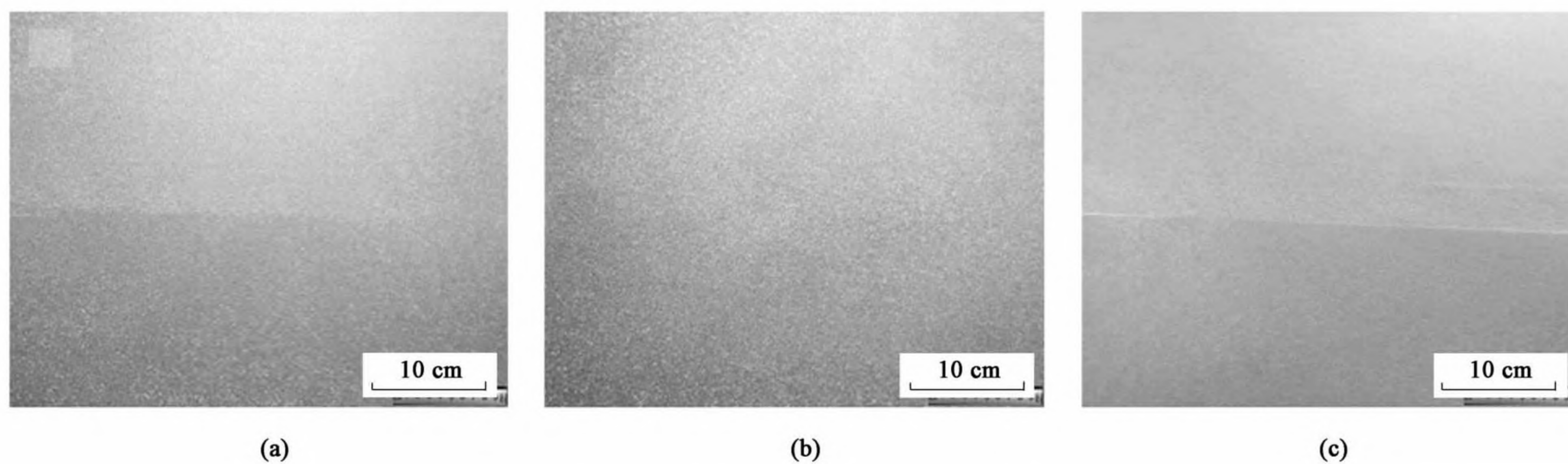


图 3 TC21 钛合金锻件经准 β 锻造后的低倍组织

(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3

Fig. 3 Macrostructures of TC21 titanium alloy forgings after quasi- β forging

(a) Plan 1 (b) Plan 2 (c) Plan 3

火次较少,虽然总变形量一致,但单火次变形量远大于其他两个方案,合金组织得到了更好的细化。

2.2 TC21 钛合金锻件的微观(高倍)组织分析

图4为方案1准 β 锻造后TC21钛合金锻件不同位置的微观组织,图4的微观组织对应了图2中高倍试样不同取样位置的显微组织。从图4可以看

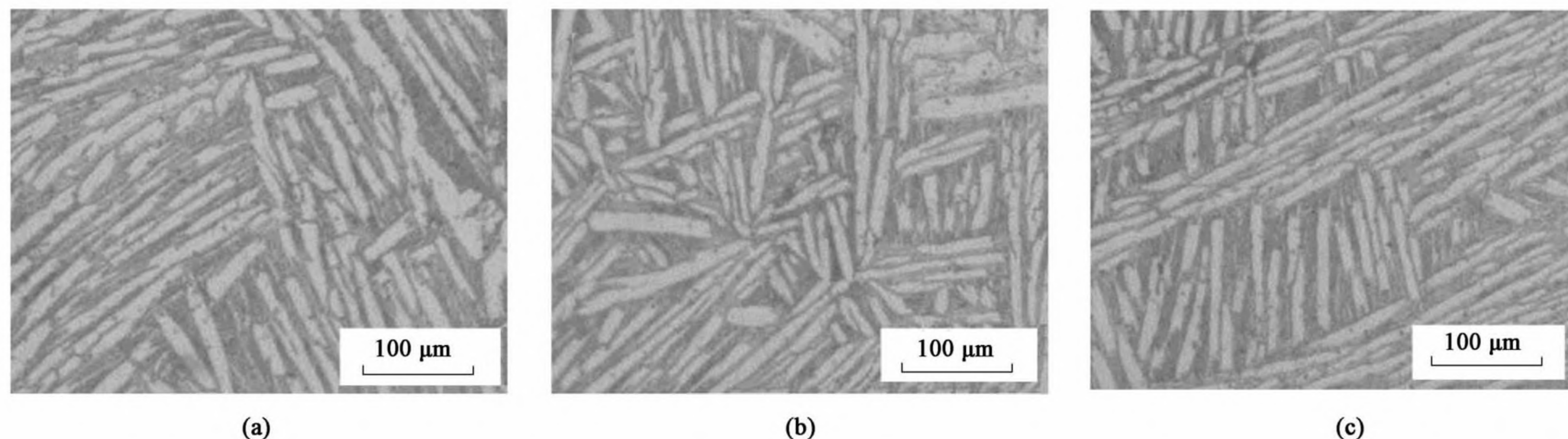


图4 方案1准 β 锻造后TC21钛合金锻件不同部位的微观组织

(a) 上部 (b) 中部 (c) 下部

Fig. 4 Microstructures in different positions of TC21 titanium alloy forgings after quasi- β forging for plan 1

(a) Top (b) Middle (c) Bottom

图5为方案2准 β 锻造后TC21钛合金锻件不同部位的微观组织,其取样位置与方案1的取样位置相同。通过与图4的微观组织对比可以发现,方案1和方案2准 β 锻造后锻件的微观组织均为网篮组织,但也可以看出,两种方案准 β 锻造后微观组织中次生片层 α 相形态存在差异。经金相软件计算,图4中TC21钛合金锻件次生片层 α 相的长度和宽度平均值分别为114和13 μm ;图5中TC21钛合金锻件次生片层 α 相的长度和宽度的平均值分别为224和19 μm ,图5中TC21钛合金锻件次生片层 α 相的长度和宽度明显大于图4,这主要是因为:图5(方案2)对应的准 β 锻造温度高于图4(方案1),温度越

出,方案1中TC21钛合金锻件的微观组织为网篮组织,原始等轴 α 相已经完全消失,次生片层 α 相长大呈束状分布。在不同取向上的片层 α 相相互交织,可以有效增大相界面,这种组织的强度和抗蠕变能力一般较好,抗裂纹扩展能力较强,从而阻止或减弱裂纹的快速扩展,提高锻件的断裂韧性^[13-16]。

高,溶质原子的扩散速率越大^[17],合金元素在更高温度下的快速扩散有利于次生片层 α 相的析出和长大。

方案3准 β 锻造后TC21钛合金锻件微观组织与另外两种工艺方案有所不同,如图6所示。方案3中TC21钛合金高倍次生片层 α 相的长度和宽度的平均值分别为88和9 μm 。从组织图中可以看出,方案3准 β 锻造组织内包含次生片层 α 相和少量等轴初生 α 相,这主要是由于方案3的锻造火次比较少、锻造温度较低,加热过程中初生 α 相转变为 β 相不完全,有少量初生 α 相残余,同样由于锻造温度较低,已经转变的片层状 β 相未能长大,而形成了较细小的 β 相网篮组织,但由于模锻准 β

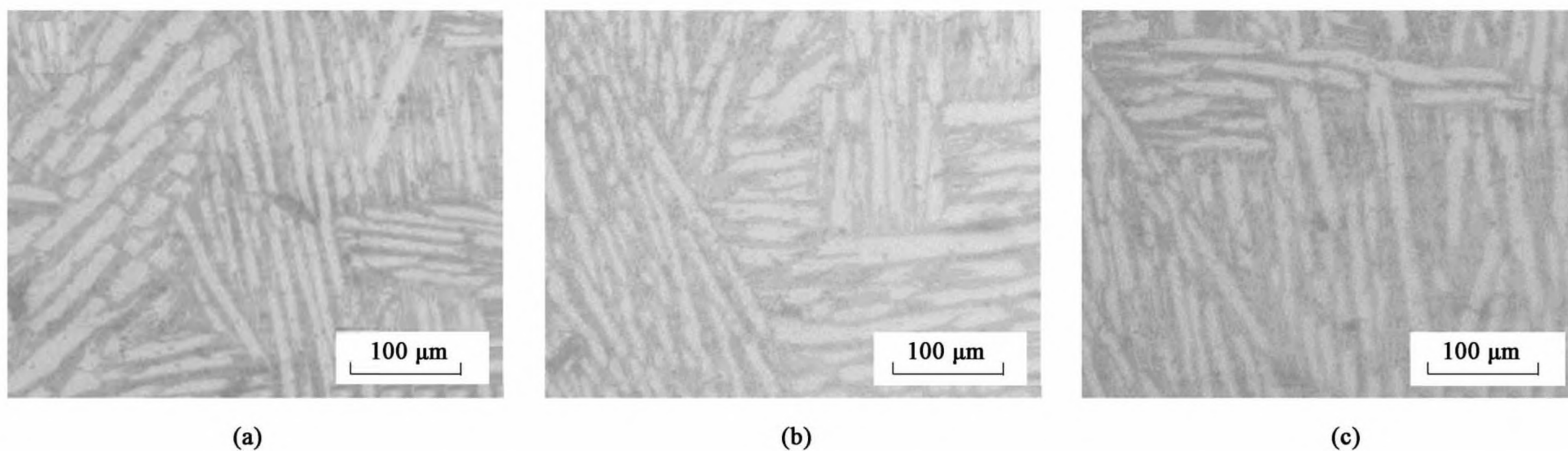


图5 方案2准 β 锻造后TC21钛合金锻件不同部位的微观组织

(a) 上部 (b) 中部 (c) 下部

Fig. 5 Microstructures in different positions of TC21 titanium alloy forgings after quasi- β forging for plan 2

(a) Top (b) Middle (c) Bottom

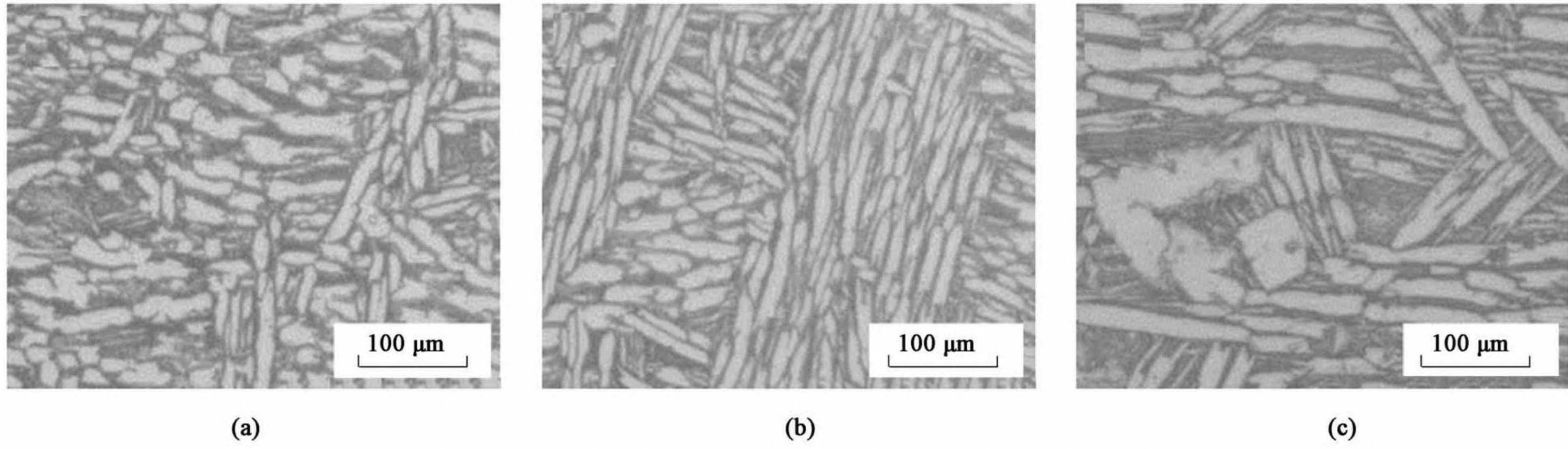


图6 方案3准β锻造后TC21钛合金锻件不同部位的微观组织
(a) 上部 (b) 中部 (c) 下部

Fig. 6 Microstructures in different positions of TC21 titanium alloy forgings after quasi-β forging for plan 3
(a) Top (b) Middle (c) Bottom

锻造是1个火次成形，材料变形量大，以及残余α相的影响，导致不同位置的微观组织出现不均匀现象。

2.3 TC21钛合金锻件的力学性能分析

3种方案准β锻造后TC21钛合金锻件的力学性能

能如图7所示，图7a~图7c分别为方案1、方案2和方案3的准β锻造后的5组力学性能测试结果，图7d为3种方案准β锻造后锻件的力学性能测试平均值对比。可以看出，TC21钛合金锻件的力学性能

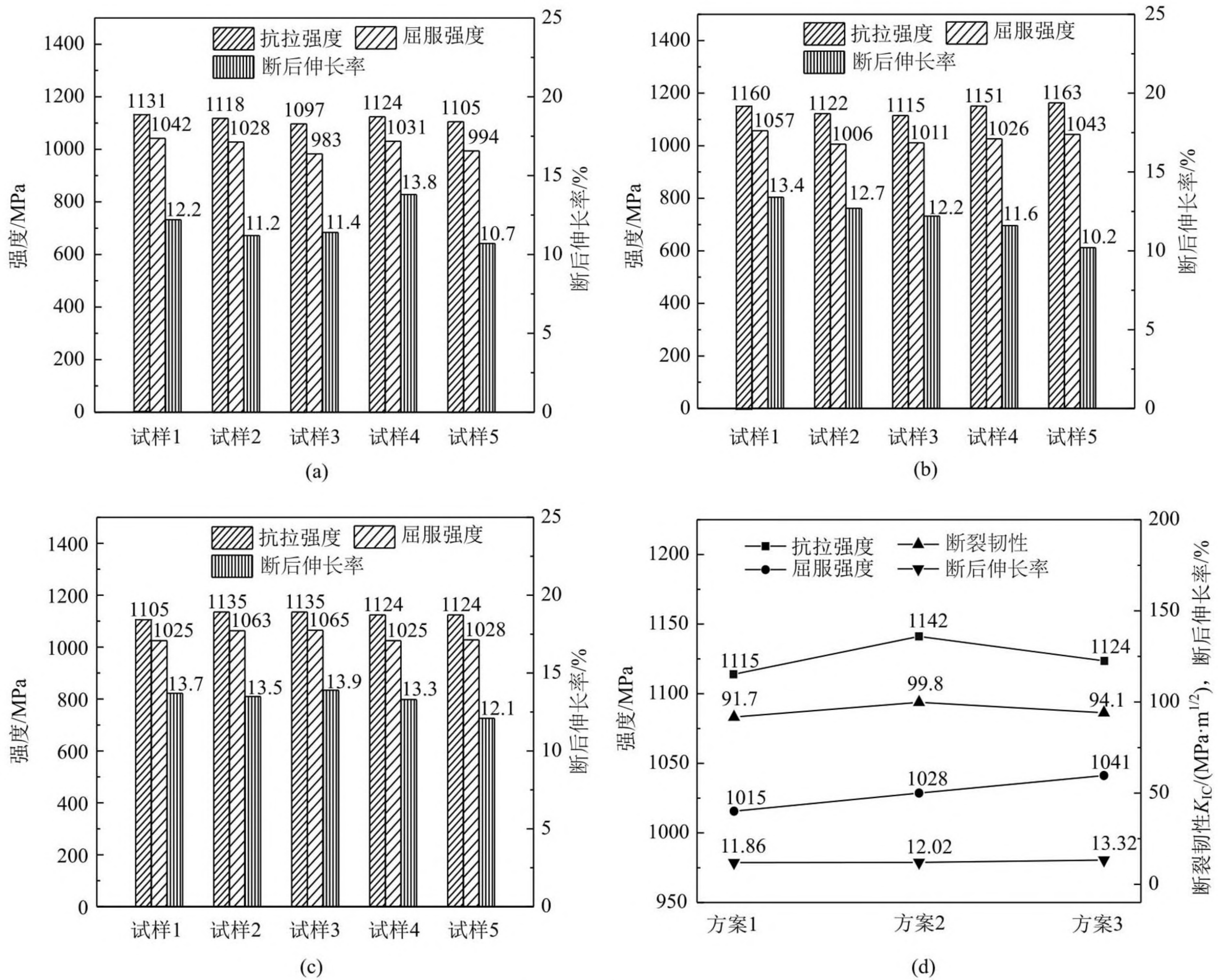


图7 TC21钛合金锻件准β锻造后的力学性能

(a) 方案1 (b) 方案2 (c) 方案3 (d) 3种方案对比

Fig. 7 Mechanical properties of TC21 titanium alloy forgings after quasi-β forging

(a) Plan 1 (b) Plan 2 (c) Plan 3 (d) Comparison of three plans

测试结果表明出高强、高韧的特征, 3 种方案准 β 锻造后 TC21 钛合金锻件的力学性能均较好, 但不同方案的工艺参数性能仍存在一定差异。由图 7 可以看出, 3 种方案准 β 锻造后得到的 TC21 钛合金锻件的抗拉强度均在 1100 MPa 左右, 最大值与最小值相差 68 MPa, 锻件强度分布比较均匀, 断后伸长率相差不大, 均稳定达到 10% 以上。方案 2 准 β 锻造后锻件的抗拉强度总体均高于另外两种方案, 这可能与方案 2 中钛合金锻件的锻造温度较高有关, 较高的锻造温度造成次生片层 α 相的长度和宽度明显大于其他两种方案。较大的次生片层 α 相尺寸, 可以使晶粒变形时滑移长度增加, 在晶界和不同位错的交界处发生滑移堵塞, 从而使抗拉强度提高。方案 3 准 β 锻造后 TC21 钛合金锻件的屈服强度和塑性指标优于方案 1 和方案 2, 这与方案 3 锻后组织内存在一定含量的等轴 α 相且片层组织较细有关。

由于钛合金的力学性能受微观组织形态的影响较大, 微观组织中相互交错编织的次生片层 α 相可以有效地阻止裂纹扩展, 提高合金的断裂韧性, 因此, 网篮组织的断裂韧性优于其他类型组织^[18-20]。为了使 TC21 钛合金获得较高的断裂韧性, 同时保持其高强度, 须控制微观组织中次生片层 α 相的数量和形态。由图 7d 可以看出, 3 种方案准 β 锻造后 TC21 钛合金锻件的断裂韧性 (K_{IC}) 均大于 $90 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 方案 2 准 β 锻造后 TC21 钛合金锻件的断裂韧性稍高于其他两种方案, 这主要与锻件微观组织中的次生片层 α 相的形态有关, 组织内网状结构越细密、网篮交织程度越好, 裂纹扩展路径会越曲折, 裂纹扩展所需能量会越高, 合金的断裂韧性也越好。

对 TC21 钛合金采用 3 种方案进行准 β 锻造, 可以发现, 不同锻造温度下的准 β 锻造均具有良好的综合性能, 但不同的锻造温度和锻造火次对合金微观组织和力学性能还是存在一定的影响。较高的锻造温度有利于获得 TC21 钛合金较完整的网篮组织, 组织中次生片层 α 相长度和宽度有所增大, 但网篮交织程度较好、网状结构比较周密, 合金的断裂韧性较优。较低的锻造温度有利于细化微观组织, 较少的锻造火次虽然可以获得更加细小的微观组织, 但大型锻件不同部位的微观组织形态存在不均匀的情况。

3 结论

(1) 准 β 锻造过程中, 较高的锻造温度 ($T_{\beta} + 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 有利于 TC21 钛合金获得完整的交织状网篮组织, 组织中次生片层 α 相的长度和宽度较大, 但

网篮交织程度好、网状结构细密, 合金的综合性能较好, 断裂韧性随着准 β 锻造温度的升高而提高。

(2) 准 β 锻造过程中, 随着加热温度的升高, 合金组织有粗化迹象, 保持相变点以上较低温度 ($T_{\beta} + 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 加热锻造, 有利于细化 TC21 钛合金的微观组织, 但锻造后显微组织中有少量的等轴 α 相残余, 且组织均匀性有所降低。

(3) 准 β 锻造过程中, 在总变形量相同的情况下, 较少的锻造火次即单火次有较大变形, 有利于获得更加细小的微观组织, 但大型锻件不同部位的微观组织形态差异化增大。

参考文献:

- [1] 赵永庆, 曲恒磊, 冯亮, 等. 高强高韧损伤容限型钛合金 TC21 研制 [J]. 钛工业进展, 2004, 21 (1): 22-24.
Zhao Y Q, Qu H L, Feng L, et al. Research on high strength, high toughness and high damage-tolerant titanium alloy-TC21 [J]. Titanium Industry Progress, 2004, 21 (1): 22-24.
- [2] 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 C K, Qu S J, Feng A H, et al. Recent advances of deformation twins in titanium and titanium alloys [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019, 43 (5): 449-460.
- [3] 曲恒磊, 赵永庆, 冯亮, 等. TC21 钛合金不同变形条件下的显微组织研究 [J]. 材料工程, 2006, (S1): 274-277.
Qu H L, Zhao Y Q, Feng L, et al. Study on microstructure of TC21 titanium alloy under different deformation conditions [J]. Journal of Materials Engineering, 2006, (S1): 274-277.
- [4] 曹春晓. 选材判据的变化与高损伤容限钛合金的发展 [J]. 金属学报, 2002, 38 (S1): 4-11.
Cao C X. Change of material selection criterion and development of high damage-tolerant titanium alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38 (S1): 4-11.
- [5] 雷锦文, 曾卫东, 朱知寿, 等. TC21 钛合金 β 锻造大块 α 相研究 [J]. 材料热处理学报, 2009, 30 (5): 14-18.
Lei J W, Zeng W D, Zhu Z S, et al. Research on blocky alpha in beta processed TC21 titanium alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30 (5): 14-18.
- [6] 朱知寿, 王新南, 童路, 等. 新型 TC21 钛合金热处理工艺参数与显微组织演变的关系研究 [J]. 钛工业进展, 2006, (6): 24-27.
Zhu Z S, Wang X N, Tong L, et al. Study on the relationship between heat treatment parameters and microstructures evolution of new type TC21 titanium alloy [J]. Titanium Industry Progress, 2006, (6): 24-27.
- [7] 周义刚, 曾卫东, 俞汉清. 近 β 锻造推翻陈旧理论发展了三态组织 [J]. 中国工程科学, 2001, (5): 61-66.
Zhou Y G, Zeng W D, Yu H Q. The near β forging overthrows the conventional forging theory and develops a new tri-modal microstructure [J]. Engineering Science, 2001, (5): 61-66.

(下转第 44 页)

- based on numerical simulation and experiment design [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2018, 43 (6): 180-184.
- [6] 徐肖, 王震, 李杭. 某汽车前门内板起皱问题研究和改进 [J]. *锻压技术*, 2019, 44 (7): 34-40.
Xu X, Wang Z, Li H. Research and improvement on wrinkling of front door inner panel for a certain vehicle [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2019, 44 (7): 34-40.
- [7] 李恒, 杨合, 詹梅, 等. 薄壁件塑性成形失稳起皱的国内研究进展 [J]. *机械科学与技术*, 2004, 23 (7): 837-842.
Li H, Yang H, Zhan M, et al. A review of the research on wrinkling in thin-walled parts plastic forming processes [J]. *Mechanical Science & Technology*, 2004, 23 (7): 837-842.
- [8] Lange Kurt. *Handbook of Metal Forming* [M]. New York: McGraw-Hill, 1985.
- [9] 李贵, 龙小裕, 杨朋, 等. 板料冲压成形摩擦研究现状及发展趋势 [J]. *锻压技术*, 2018, 43 (4): 1-8.
Li G, Long X Y, Yang P, et al. Research status and development trend of friction in stamping of sheet metal [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2018, 43 (4): 1-8.
- [10] 杨文华, 吉卫, 吴刚, 等. 基于 Dynaform 的浅球壳冲压成形及回弹研究 [J]. *锻压技术*, 2018, 43 (9): 41-46.
Yang W H, Ji W, Wu G, et al. Stamping forming and spring-back of shallow spherical shell based on Dynaform [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2018, 43 (9): 41-46.
- [11] 高恩志, 陈文超, 李作成, 等. 纯钛半球形零件拉深回弹影响因素分析 [J]. *锻压技术*, 2018, 43 (12): 57-61.
Gao E Z, Chen W C, Li Z C, et al. Analysis on drawing spring-back influencing factors for pure titanium hemispherical part [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2018, 43 (12): 57-61.
- [12] 蒋鹏. *模具标准应用手册: 锻模卷* [M]. 北京: 中国质检出版社 (中国标准出版社), 2018.
Jiang P. *Die Standard Application Manual: Forging Die Roll* [M]. Beijing: China Quality Publishing House (China Standard Publishing House), 2018.
-
- (上接第 34 页)
- [8] 毕彦, 乔靖雯, 马叙, 等. 锻造温度对新型含铌汽车钛合金棒材性能的影响 [J]. *锻压技术*, 2018, 43 (9): 14-20.
Bi Y, Qiao J W, Ma X, et al. Forging formability analysis on Cu-Cr-Zr rotor end ring of high power motor [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2018, 43 (9): 14-20.
- [9] 石志峰. TC21 钛合金工艺优化及组织性能关系研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
Shi Z F. *Researches on Processing Optimization and Microstructure-property Relationship of TC21 Titanium Alloy* [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.
- [10] 赖运金. 钛合金片状组织演变机制与球化动力学研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
Lai Y J. *Study on Microstructural Evolution of Lamellar Structure and Globularization Kinetics of Titanium Alloy* [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [11] 程新江, 代洪庆. TC21 合金准 β 锻热变形过程数值模拟及试验研究 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2017, 37 (2): 136-139.
Cheng X J, Dai H Q. Simulation of quasi β forging deformation process in TC21 alloy and experiment [J]. *Special-cast and Non-ferrous Alloys*, 2017, 37 (2): 136-139.
- [12] 王涛, 万志鹏, 孙宇, 等. 镍基变形高温合金动态软化行为与组织演变规律研究 [J]. *金属学报*, 2018, 54 (1): 83-92.
Wang T, Wan Z P, Sun Y, et al. Dynamic softening behavior and microstructure evolution of nickel base superalloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54 (1): 83-92.
- [13] 邹忠波, 董洪波, 朱深亮, 等. 三重热处理温度对 TC21 钛合金显微组织的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2016, 36 (4): 438-441.
Zou Z B, Dong H B, Zhu S L, et al. Effects of triple heat treatment temperature on microstructure of TC21 titanium alloy [J]. *Special-cast and Non-ferrous Alloys*, 2016, 36 (4): 438-441.
- [14] Shi Z F, Guo H Z, Zhang J W, 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.
- [15] Wen X, Wan M P, Huang C W, et al. Strength and fracture toughness of TC21 alloy with multi-level lamellar microstructure [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 740-741: 121-129.
- [16] 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 L Y, Li M D, Yang G, 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.
- [17] 袁士翀, 王周田, 高志刚, 等. β 锻造参数对 TC17 钛合金组织性能的影响 [J]. *锻压技术*, 2018, 43 (2): 14-18.
Yuan S C, Wang Z T, Gao Z G, et al. Influence of β forging parameters on microstructure and properties of titanium alloy TC17 [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2018, 43 (2): 14-18.
- [18] 李鑫. TC11 钛合金的热态变形行为及其锻造工艺优化研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
Li X. *Hot Deformation Behavior and Forging Process Optimization of TC11 Titanium Alloy* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [19] 朱知寿. 航空结构用新型高性能钛合金材料技术研究与发展 [J]. *航空科学技术*, 2012, (1): 5-9.
Zhu Z S. Recent research and development of titanium alloys for aviation uses in China [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, (1): 5-9.
- [20] Fei Y H, Zhou L, Qu H L, et al. The phase and microstructure of TC21 alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 494 (1-2): 166-172.