中北大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF NORTH UNIVERSITY OF CHINA(NATURAL SCIENCE EDITION)
2026年 第47卷 第2期(总第226期)
Vol. 47 No. 2 2026(Sum No. 226)

文章编号：1673-3193(2026)02-0164-07 J. North Univ. China, Nat. Sci. Ed., 2026, 47(2): 164-170.

固溶时效处理对TC4钛合金显微组织及性能的影响

严晓琨[1,2,3]，李佳翔[1,2,3]，董瑞峰[1,2,3*]，郭宇墨[1,2,3]，赵宇宏[1,2,3,4*]

(1. 中北大学 材料科学与工程学院，山西 太原 030051；
2. 中北大学 教育部共建铝/镁合金材料研发应用协同创新中心，山西 太原 030051；
3. 中北大学 新材料智能铸造先进成型山西省重点实验室，山西 太原 030051；
4. 北京科技大学 北京材料基因工程高精尖创新中心，北京 100083)

摘　要：为了拓展α+β双相TC4钛合金的工程应用范围，需要精准调控其显微组织和力学性能。本文以锻态TC4钛合金为研究对象，以优化其强塑匹配为研究目标，通过金相显微镜、扫描电子显微镜观察组织演变，结合室温拉伸实验测试力学性能，系统研究了920 ℃(40 min)固溶处理后水冷、空冷、炉冷三种冷却方式，以及水冷固溶后500 ℃(3 h)、550 ℃(3 h)、600 ℃(3 h)不同温度时效处理对合金显微组织及力学性能的影响规律。结果表明：固溶冷却方式对合金组织影响显著，空冷后形成等轴初生α相+片层α相的双态组织，综合力学性能最优；水冷固溶后随时效温度的升高，次生α相和片层α相逐渐粗化、片层间距增大，550 ℃为最优时效温度。经920 ℃(40 min)水冷和550 ℃(3 h)时效处理后，合金实现了强度与塑性的最佳匹配，抗拉强度达到1 022 MPa，延伸率达到13%。本研究明确了TC4钛合金固溶时效的最优工艺制度，为该合金的组织性能调控及热处理工艺制定提供了具体的技术参考和实践指导。

关键词：TC4钛合金；固溶处理；时效处理；显微组织；力学性能

中图分类号：T31 **文献标识码：**A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.10.0003

引用格式：严晓琨，李佳翔，董瑞峰，等. 固溶时效处理对TC4钛合金显微组织及性能的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2026，47(2)：164-170.

YAN Xiaokun, LI Jiaxiang, DONG Ruifeng, et al. Effect of solution aging treatment on the microstructure and properties of TC4 titanium alloy[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(2): 164-170.

Effect of Solution Aging Treatment on the Microstructure and Properties of TC4 Titanium Alloy

YAN Xiaokun[1,2,3], LI Jiaxiang[1,2,3], DONG Ruifeng[1,2,3*], GUO Yumo[1,2,3], ZHAO Yuhong[1,2,3,4*]

(1. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. MOE Jointly Collaborative Innovation Center for High-Performance Al/Mg Based Materials, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. Shanxi Key Laboratory of Intelligent Casting and Advanced Forming for New Materials, North University of China, Taiyuan 030051, China;
4. Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to expand engineering application ranges of TC4 titanium alloy with α+β dual-phase, its microstructure and mechanical properties need to be precisely controlled. Taking forged TC4 as the research

收稿日期：2025-10-09

基金项目：山西省重点研发计划项目(202202050201014)

作者简介：严晓琨(2000—)，男，硕士生，主要从事钛及钛合金热处理、组织-性能调控研究。

* **通信作者：**董瑞峰(1989—)，男，副教授，博士，主要从事钛及钛合金设计及组织-性能调控研究。E-mail：drf9527@nuc.edu.cn。
赵宇宏(1974—)，女，教授，博士，主要从事新型半固态/液态成型设备/工艺及优化、高性能有色金属的先进加工及制备、凝固过程宏观微观模拟、集成计算材料工程等方面的研究。E-mail：zhaoyuhong@nuc.edu.cn。

object, this study aims to optimize its strength-plasticity synergy. Systematically investigated were the effects of three cooling methods (water cooling, air cooling, and furnace cooling) following solution treatment at 920 ℃ (40 min), as well as aging treatments at 500 ℃, 550 ℃, and 600 ℃ for 3 h after water-cooled solution treatment, on the alloy's microstructure and mechanical properties. Microstructural evolution was observed using optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM), while mechanical properties were characterized via room-temperature tensile tests. The results indicate that solution cooling significantly influences the alloy's microstructure. Air cooling induces a stable bimodal microstructure composed of equiaxed primary α grains and lamellar α phases, endowing the alloy with optimal comprehensive mechanical properties. After water-cooled solution treatment, secondary α phases and lamellar α grains gradually coarsen with increasing aging temperature, accompanied by an expansion of the interlamellar spacing. Among these, 550 ℃ is identified as the optimal aging temperature. The alloy achieves the best strength-plasticity balance after combined treatment at 920 ℃ (40 min) water cooling followed by 550 ℃(3 h) aging, with an ultimate tensile strength of 1022 MPa and an elongation of 13%. This study clarifies the optimal solution and aging parameters for forged TC4, and provides reliable technical references and guidance for microstructure-property regulation and heat treatment process formulation in practical engineering.

Key words: TC4 titanium alloy; solution treatment; aging treatment; microstructure; mechanical properties

0　引　言

TC4钛合金作为目前应用最广泛的α+β双相钛合金，具备强度高、密度小和耐腐蚀性好等优点[1]。热处理是调控TC4合金内部微观结构的重要工艺手段之一，设计不同的热处理工艺，通过调控微观组织可以使其获得更优性能[2-13]。同时，固溶处理是调控钛合金微观组织，尤其是初生α相(α_p)和β基体状态的关键预处理工艺，其核心目的在于通过高温溶解和快速冷却，形成一种过饱和亚稳β固溶体，为后续时效过程中次生α相(α_s)的析出奠定组织基础。通过对新型TC4钛合金进行固溶处理和时效处理，研究其在热处理过程中的组织演变规律，可以为TC4合金热处理工艺的制定提供指导[14-15]。

本文以锻态TC4钛合金为研究对象。首先，将试样进行固溶处理，并采用不同的冷却方式(空冷、炉冷和水冷)进行冷却。然后，通过组织标准和不同冷却方式下TC4合金的性能对比，研究固溶冷却方式对合金组织及性能的影响，并确定最佳冷却方式。接着，将其进行不同温度下的时效处理，研究不同时效温度对合金组织及其性能的影响规律。最后，确定TC4合金最佳的固溶和时效工艺制度。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料

本文实验材料为锻态TC4钛合金，其化学成分及质量分数如表1所示。采用真空自耗电弧熔法制备TC4铸锭。对铸锭进行扒皮、去冒口后，在β单相区进行开坯锻造，并最终在接近β转变温度的α+β两相区完成锻造。通过金相法测得该合金的β转变温度约为980 ℃。

表1　TC4钛合金成分

Tab. 1　Composition of TC4 titanium alloy　%

ω_C	ω_H	ω_O	ω_N	ω_V	ω_{Si}	ω_{Fe}	ω_{Al}	ω_{Ti}
0.080	0.015	0.200	0.050	3.420	0.290	0.280	6.550	89.115

1.2　实验方法

1.2.1　实验过程

利用线切割机将TC4钛合金板切割成若干试样，对这些试样进行显微组织观察和力学实验测试，将全部试样进行固溶处理，随后在管式炉中加热至920 ℃，并且保持此温度40 min，随后分别用空冷、炉冷和水冷三种冷却方式对试样进行冷却。将试样进行电解抛制样，用扫描电镜对其进行组织观察。用砂纸对初始和冷却后的试样进行打磨，去除表面的氧化皮，然后进行拉伸至断裂。根据以上处理结果分析不同冷却方式对TC4钛合金的显微组织和力学性能的影响。在500 ℃、550 ℃和600 ℃温度下对水冷固溶的试样进行时效处理，空冷，然后进行拉伸实验，利用SEM对断裂后的试样进行观察，分析出TC4钛合金的显微组织和力学性能的影响。

1.2.2　固溶处理方案

将切割出来的试样放入SG-GL1200管式炉中，

加热到920 ℃，然后保温40 min，再对其用空冷、炉冷、水冷三种不同的冷却方式进行冷却。固溶处理工艺流程如图1所示。

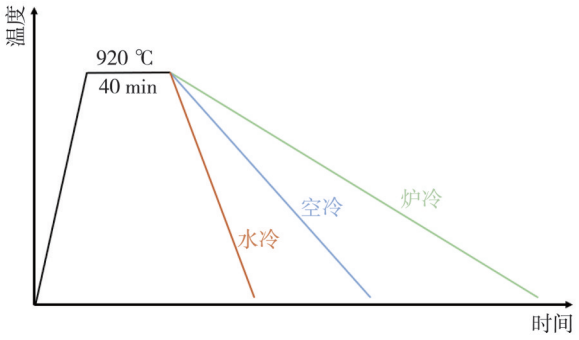


图1 固溶处理工艺图

Fig. 1 Solution treatment process diagram

1.2.3 时效处理方案

将切割出来的试样放入管式炉内，并加热至920 ℃，随后保温40 min并进行水冷。然后再将其分别加热到500 ℃、550 ℃和600 ℃，保温3 h，进行时效处理。时效处理工艺图如图2所示。

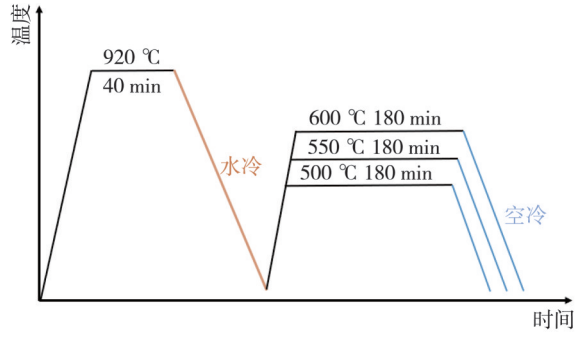


图2 时效处理工艺图

Fig. 2 Aging process diagram

1.2.4 显微组织观察方案

首先使用80#、400#、800#、1 500#、3 000#的SiC砂纸对试样依次进行研磨至表面光亮，然后使用Struers LectroPol-5电解抛光机对研磨后的试样进行电解抛光。电解液是乙醇和高氯酸的混合溶液，体积分数分别为90%和10%。电解抛光机的参数：抛光时间为30 s，电压为25 V，实验温度为−5 ℃左右。制备好试样后，采用金相显微镜和扫描电子显微镜对其进行显微组织观察。金相显微镜型号为DM18/MC190HD，扫描电子显微镜型号为JSM-IT800。

1.2.5 力学性能实验

实验采用SHIMADZU拉伸试验机。由TC4钛合金板上切割的拉伸试样及其尺寸如图3所示。首先对拉伸试样进行不同冷却方式的固溶处理，再使用400#砂纸将未处理的初始试样和固溶处理好的试样进行研磨，然后在室温条件下进行拉伸试验，应变速率为0.001 s^{-1}。将固溶处理后的拉伸试样进行500 ℃(3 h)、550 ℃(3 h)、600 ℃(3 h)的时效处理，空冷后对其表面进行研磨。在室温下进行三组拉伸试验，应变速率为0.001 s^{-1}。

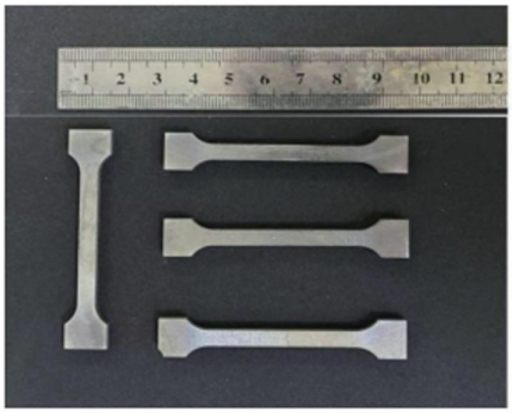


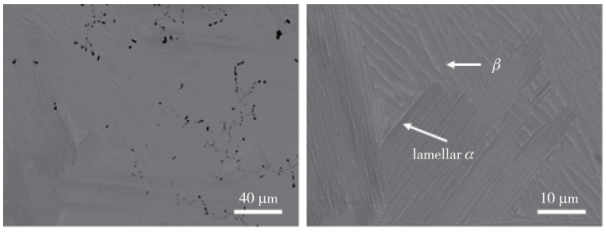
图3 拉伸试样及其尺寸

Fig. 3 Tensile specimen and the size

2 结果与讨论

2.1 固溶冷却方式对合金显微组织的影响

图4为初始状态未经处理的TC4钛合金的显微组织图及其放大图。可以看出，初始状态的TC4钛合金由两种相(α相和β相)组成。颜色较深且呈现为片层状的相为α相，在晶粒中纵横交错排列形成网篮组织；颜色较浅，呈白色的为残余β相。



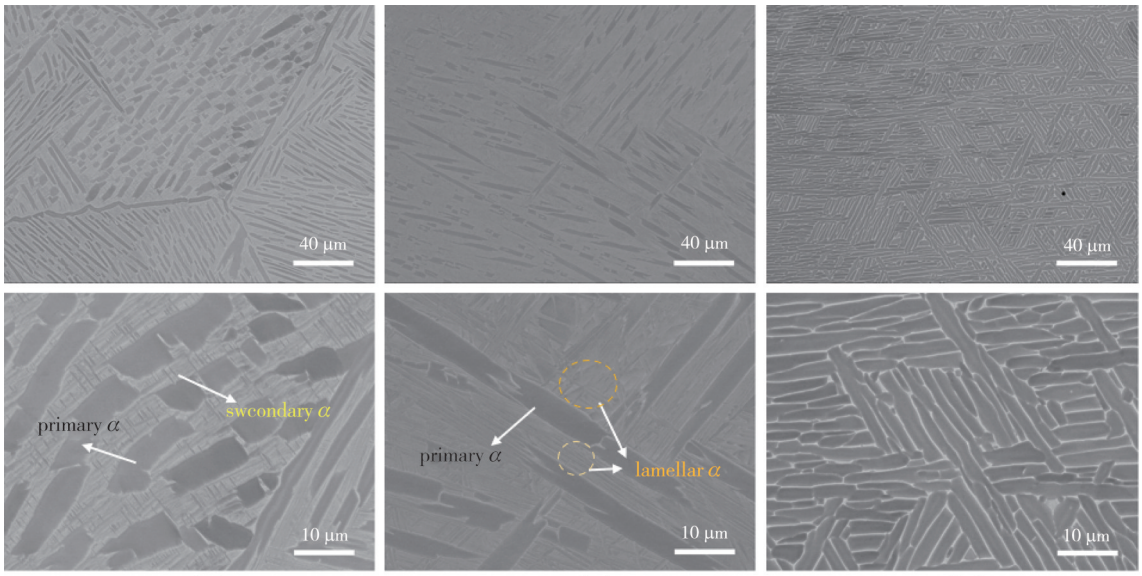
(a) 显微组织图 (b) 放大图

图4 TC4钛合金初始试样显微组织图

Fig. 4 Microstructure of the as-received TC4 titanium alloy sample

对TC4钛合金试样进行固溶处理，水冷、空冷和炉冷后的显微组织及其局部放大图如图5所示。图5(a)中等轴状的初生α相(α_p)和针状的次生α相(α_s)均匀分布在β基体中。在水冷过程中组织为稳定相，形态和大小基本不发生变化；由于水冷的冷却速度极快，抑制了β相中合金元素的扩散，α_s通过无扩散的切变机制由β相转变为过饱和的六方马氏

体，组织为等轴α_p＋针状α_s。空冷后的组织与水冷类似，α_p都均匀分散在β基体中，如图 5(b) 所示。由于冷却速度较慢可以为β相的分解提供有限的时间和驱动力，片层α首先在晶界处析出，然后在β晶粒内部以特定的晶体学位向关系成核并长大，形成如图 5(b) 中下图所示的集束状或片层状，组织为等轴α_p＋片层α，即典型的“双态组织”。炉冷后的组织与前两者明显不同，如图 5(c)，只能观察到球化的α_p和粗大的片层α。由于炉冷的速度非常慢，β相有充分的时间进行扩散型相变，形成粗大、清晰可见的片层α，这些片层α与残余的β相交替排列，形成类似“篮网”状的结构；同时慢冷也使得α_p的比例更高，α_p在缓慢冷却过程中，会发生轻微的长大或球化，组织为等轴α_p＋粗大片层α，更接近平衡状态[16]。



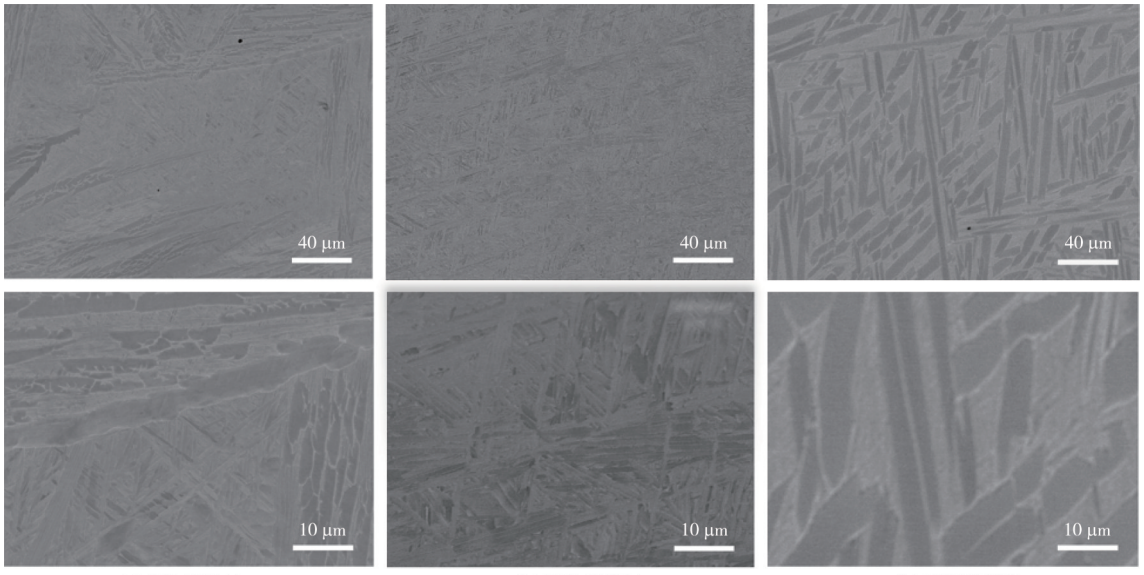
(a) 空冷　(b) 水冷　(c) 炉冷

图 5　固溶处理后水冷、空冷和炉冷的TC4钛合金显微组织及其放大图

Fig. 5　Microstructure and magnification of TC4 titanium alloy after solution treatment with water cooling, air cooling and furnace cooling

2.2　时效处理对合金显微组织的影响

将固溶处理（水冷）的 TC4 钛合金试样在 500 ℃、550 ℃和 600 ℃下进行 3 h 的时效处理，得到的显微组织如图 6 所示。



(a) 500 ℃(3 h)　(b) 550 ℃(3 h)　(c) 600 ℃(3 h)

图 6　TC4钛合金经过不同温度时效处理后的显微组织及其放大图

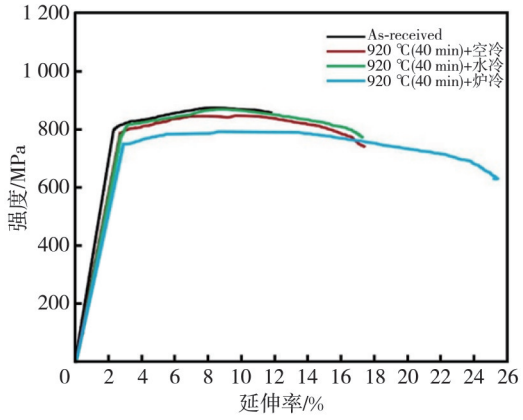
Fig. 6　Microstructure and magnification of TC4 titanium alloy after aging treatment at different temperatures

α_s弥散地析出在β基体[17]中，如图6(a)所示，500 ℃时效后的α_s非常细小，弥散度极高，随着时效温度的升高，原子扩散能力增强，析出的α_s会进一步长大和粗化，且片层间距也会明显增大。α_s的形核和长大存在竞争关系。低温下的时效处理有利于α相的形核，高温下的时效处理更有利于α相的生长。

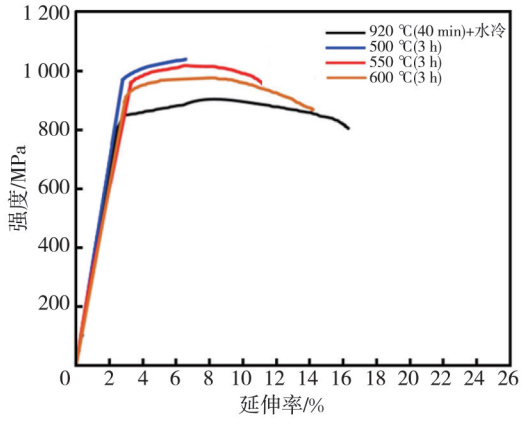
在α相总体积分数一定的前提下，低温时效处理条件下新形成的次生α相尺寸较小，高温时效处理条件下的尺寸较大。片层α在不同温度时效处理后的形貌变化也与α_s类似，随着温度的升高，明显粗化且间距增大，在时效温度为600 ℃时最明显，如图6(c)所示。

2.3 力学性能

图7为不同冷却方式固溶、920 ℃(40 min)水冷和不同温度时效处理后的TC4的强度-延伸率曲线图。



(a) 水冷、空冷、炉冷的固溶处理



(b) 500 ℃、550 ℃、600 ℃时效处理

图7 不同条件下的TC4的强度-延伸率曲线图

Fig. 7 Strength-elongation curve of TC4 titanium alloy under different conditions

结合表2可以看出，与初始状态对比，采用炉冷的固溶处理试样的延伸率最高，强度最低；水冷试样具有最高的强度，而空冷试样则表现出更优的强塑匹配。

表2 不同条件下的TC4的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of TC4 under different conditions

热处理工艺	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断裂延伸率/%
初始	845	870	12.0
空冷	823	838	17.9
水冷	840	855	17.0
炉冷	790	810	25.7
水冷+500 ℃(3 h)	980	1 040	8.0
水冷+550 ℃(3 h)	970	1 022	13.0
水冷+600 ℃(3 h)	890	920	16.0

由于炉冷时β相完全分解为粗大的片层α，这种粗大组织意味着α/β相界面急剧减少，对位错运动的阻碍作用大大减弱，因此强度较低；另一方面，在粗大的α相内部，位错可以自由滑移很长的距离，变形协调能力强，不易产生应力集中，使材料能够发生均匀、持续的塑性变形，从而表现出较高的延伸率和断面收缩率[18]。水冷产生的弥散针状α_s则会产生巨大的相界面(相界面强化)，并引起严重的晶格畸变[19]，能有效地阻碍位错运动，可以大大提高强度[20]；同时大量不易变形的α_s[21]和复杂的界面限制了位错的协调运动，容易产生应力集中，导致塑性降低。空冷后的组织为等轴α_p+片层α，细小的片层α提供了大量的α/β相界面，能有效阻碍位错，提高强度(通常略低于水冷产生的α_s强化)；相对于α_p良好的塑性能力，片层α本身也具有一定的协调变形能力，这种等轴α_p(“软相”)+片层α(“硬相”)的复合结构实现了强度和塑性的最佳平衡。时效处理旨在使这些亚稳定的β转变组织进一步分解，析出弥散分布的次生α相，从而达到强化目的。500 ℃时效后由于其析出的α_s非常细小且弥散度高，通常塑性较差但可以获得很高的强度。随着温度的升高，550 ℃时效后的α_s明显粗化且尺寸增大；与500 ℃时效相比，片层α略微粗大，片层间距增大，两者共同作用通常会导致强度略有下降，但塑性会有所改善，有助于实现强度和塑性的良好配合[22]。在更高的时效温度下，片层α与α_s会进一步显著长大和粗化，形成粗大的片层和短棒状组织，导致合金的强度显著下降，但塑性会进一步提高[23]。综上，对不同条件下的TC4的显微组织分析所得结论与表2中的力学性能结果相符合；采用920 ℃(40 min)+空冷的固溶处理方式得到的TC4合金的综合性能在三种冷却方式中最好；

920 ℃(40 min)水冷＋550 ℃(3 h)时效处理的综合性能最佳，抗拉强度达到1 022 MPa，延伸率达到13%，实现了强度和塑性的良好匹配。

3　结　论

本文研究了固溶处理冷却方式和时效处理工艺对TC4合金显微组织和力学性能的影响，结论如下：

1）TC4合金经过920 ℃(40 min)固溶处理空冷后的显微组织为等轴α_p＋片层α，综合力学性能最优；炉冷后的显微组织为等轴α_p＋粗大片层α，炉冷工艺导致强度显著降低；水冷后的显微组织为等轴α_p＋针状α_s，水冷工艺则导致塑性明显下降。

2）时效处理过程中，随着时效温度的升高针状α_s和片层α_s逐渐长大且间距增大。

3）TC4钛合金经920 ℃(40 min)水冷＋550 ℃(3 h)处理后的综合性能最优，抗拉强度达到1 022 MPa，延伸率达到13%。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] 郭凯，何忝锜，和蓉. TC4钛合金热处理工艺的研究现状及进展[J]. 世界有色金属，2021(7):16-17.
GUO Kai, HE Tianqi, HE Rong. Research status and progress of heat treatment process of TC4 titanium alloy[J]. World Nonferrous Metals, 2021(7): 16-17.（in Chinese）

[2] 白煜，张俊庭，贾一凡，等. 激光增材制造高强度双相 Ti-10Fe-xO 合金[J]. 兵器材料科学与工程，2025，48(4)：20-24.
BAI Yu, ZHANG Junting, JIA Yifan, et al. Laser additive manufacturing of high strength bi-phase Ti-10Fe-xO alloy [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2025, 48(4): 20-24.（in Chinese）

[3] 董晓锋，张明玉，郭新，等. Ti-55511钛合金高温拉伸变形行为及显微组织演变[J]. 兵器材料科学与工程，2023，46(1)：35-43.
DONG Xiaofeng, ZHANG Mingyu, GUO Xin, et al. High temperature tensile deformation behavior and microstructure evolution of Ti-55511 titanium alloy [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2023, 46(1): 35-43.（in Chinese）

[4] 李东宽，郭岩，杨立新，等. TC4钛合金两相区的热变形行为及微观组织[J]. 铸造技术，2022，43(2)：114-119.
LI Dongkuan, GUO Yan, YANG Lixing, et al. Thermal deformation behavior and microstructure of TC4 titanium alloy in two-phase region[J]. Foundry Technology, 2022, 43(2): 114-119.（in Chinese）

[5] 宁子轩，王琳，程兴旺，等. 热处理工艺对Ti-6321合金板材组织和力学性能影响[J]. 兵器材料科学与工程，2020，43(6)：26-31.
NING Zixuan, WANG Lin, CHENG Xingwang, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ti-6321 titanium alloy sheet [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2020, 43(6): 26-31.（in Chinese）

[6] ZHAO Z Y, LI L, BAI P K, et al. The heat treatment influence on the microstructure and hardness of TC4 titanium alloy manufactured via selective laser melting [J]. Materials, 2018, 11(8): 1318.

[7] CHEN Z W, WU X, HE L J, et al. Comparative study on micro-milling machinability of titanium alloys prepared by different processes: Forging process, additive manufacturing process and heat-treatment process [J]. Precision Engineering, 2024(88): 164-176.

[8] QI C Q, DU Y, YANG P, et al. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 fabricated by laser melting deposition[J]. Metals and Materials International, 2022, 28(12): 3068-3079.

[19] 杜刚，孙小平，高玉社，等. 低温固溶及时效处理对TC4钛合金棒材组织及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2018，47(6)：1941-1944.
DU Gang, SUN Xiaoping, GAO Yushe, et al. Effect of low temperature solution and aging treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 alloy bars [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(6): 1941-1944.（in Chinese）

[10] 张治民，刘海军，任璐英，等. 热处理对热等静压态TC4合金及其降温多道次变形微观组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2020，49(4)：1372-1378.
ZHANG Zhimin, LIU Haijun, REN Luying, et al. Effect of heat treatment on microstructure of hot isostatic pressed TC4 alloy and its multi-pass deformation [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(4): 1372-1378.（in Chinese）

[11] 刘建强. TC4钛合金的显微组织及其抗冲击韧性[J]. 热加工工艺，2013，42(12)：63-66.
LIU Jianqiang. Microstructure and impact toughness

resistance of TC4 titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(12): 63-66.(in Chinese)

[12] 刘涛, 邵博, 雷经发, 等. 固溶温度对TC4钛合金微观组织和动态拉伸力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(12): 4133-4140.
LIU Tao, SHAO Bo, LEI Jingfa, et al. Effect of solid solution temperature on the microstructure and dynamic tensile mechanical properties of TC4 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(12): 4133-4140.(in Chinese)

[13] ZHANG S, LIN Y C, WANG L H, et al. Effects of aging treatment on the microstructures and mechanical properties of a TC18 alloy[J]. Materials, 2024, 17(3): 570.

[14] 高学敏, 王晗, 王可迪, 等. 固溶时效处理对Ti-6Al-4V ELI钛合金准静态和动态力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(11): 87-91.
GAO Xuemin, WANG Han, WANG Kedi, et al. Effects of solution and aging treatment on quasi-static and dynamic mechanical properties of Ti-6Al-4V ELI titanium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(11): 87-91.(in Chinese)

[15] 霍进良, 蔡瑛, 佟海生, 等. 新型TC4钛合金材料热处理工艺研究[J]. 新技术新工艺, 2023(11): 64-69.
HUO Jinliang, CAI Ying, TONG Haisheng, et al. Research on heat treatment process of new TC4 titanium alloy material[J]. New Technology & New Process, 2023(11): 64-69.(in Chinese)

[16] 韩颢源, 杨涛, 邱娟, 等. 固溶处理对TC4合金组织和硬度的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(6): 93-98.
HAN Haoyuan, YANG Tao, QIU Juan, et al. Effect of solution treatment on microstructure and hardness of TC4 alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(6): 93-98.(in Chinese)

[17] 黄森森, 马英杰, 张仕林, 等. $\alpha+\beta$两相钛合金元素再分配行为及其对显微组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2019, 55(6): 741-750.
HUANG Sensen, MA Yingjie, ZHANG Shilin, et al. Influence of alloying elements partitioning behaviors on the microstructure and mechanical properties in $\alpha+\beta$ titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(6): 741-750.(in Chinese)

[18] 张明玉. 不同温度加热随后炉冷的TC4 ELI钛合金的微观组织和力学性能[J]. 热处理, 2024, 39(2): 30-33.
ZHANG Mingyu. Microstructure and mechanical property of TC4 ELI titanium alloy heated at different temperatures then cooled in furnace[J]. Heat Treatment, 2024, 39, 39(2): 30-33.(in Chinese)

[19] 周俊, 汪宏斌, 徐雨浩, 等. 固溶处理对TC4钛合金组织和力学性能的影响[J]. 上海金属, 2023, 45(6): 47-54.
ZHOU Jun, WANG Hongbin, XU Yuhao, et al. Effect of solution treatment on the microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy [J]. Shanghai Metals, 2023, 45(6): 47-54.(in Chinese)

[20] 肖树龙, 陈兆琦, 荆科, 等. 热处理对亚稳β钛合金显微组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(6): 1655-1664.
XIAO Shulong, CHEN Zhaoqi, JING Ke, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of metastable β titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(6): 1655-1664.(in Chinese)

[21] 劳振宏, 张浩宇, 王圣元, 等. 不同尺寸的α相对亚稳β钛合金Ti-5.5Cr-5Al-4Mo-3Nb-2Zr拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(9): 2430-2437.
LAO Zhenhong, ZHANG Haoyu, WANG Shengyuan, et al. Effect of different sizes of α phase on tensile properties of metastable β titanium alloy Ti-5.5Cr-5Al-4Mo-3Nb-2Zr[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(9): 2430-2437.(in Chinese)

[22] 任驰强, 丁一明, 李佳佳, 等. 固溶-时效对TC4钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 湖南有色金属, 2022, 38(2): 44-46.
REN Chiqiang, DING Yiming, LI Jiajia, et al. Effect of solution-aging on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2022, 38(2): 44-46.(in Chinese)

[23] 侯红苗, 秦成, 潘浩, 等. 超低间隙TC4-DT钛合金厚板显微组织与力学性能研究[J]. 钛工业进展, 2022, 39(5): 1-5.
HOU Hongmiao, QIN Cheng, PAN Hao, et al. Study on microstructure and mechanical properties of extra low interstitialTC4-DT titanium alloy thick plate[J]. Titanium Industry Progress, 2022, 39(5): 1-5.(in Chinese)